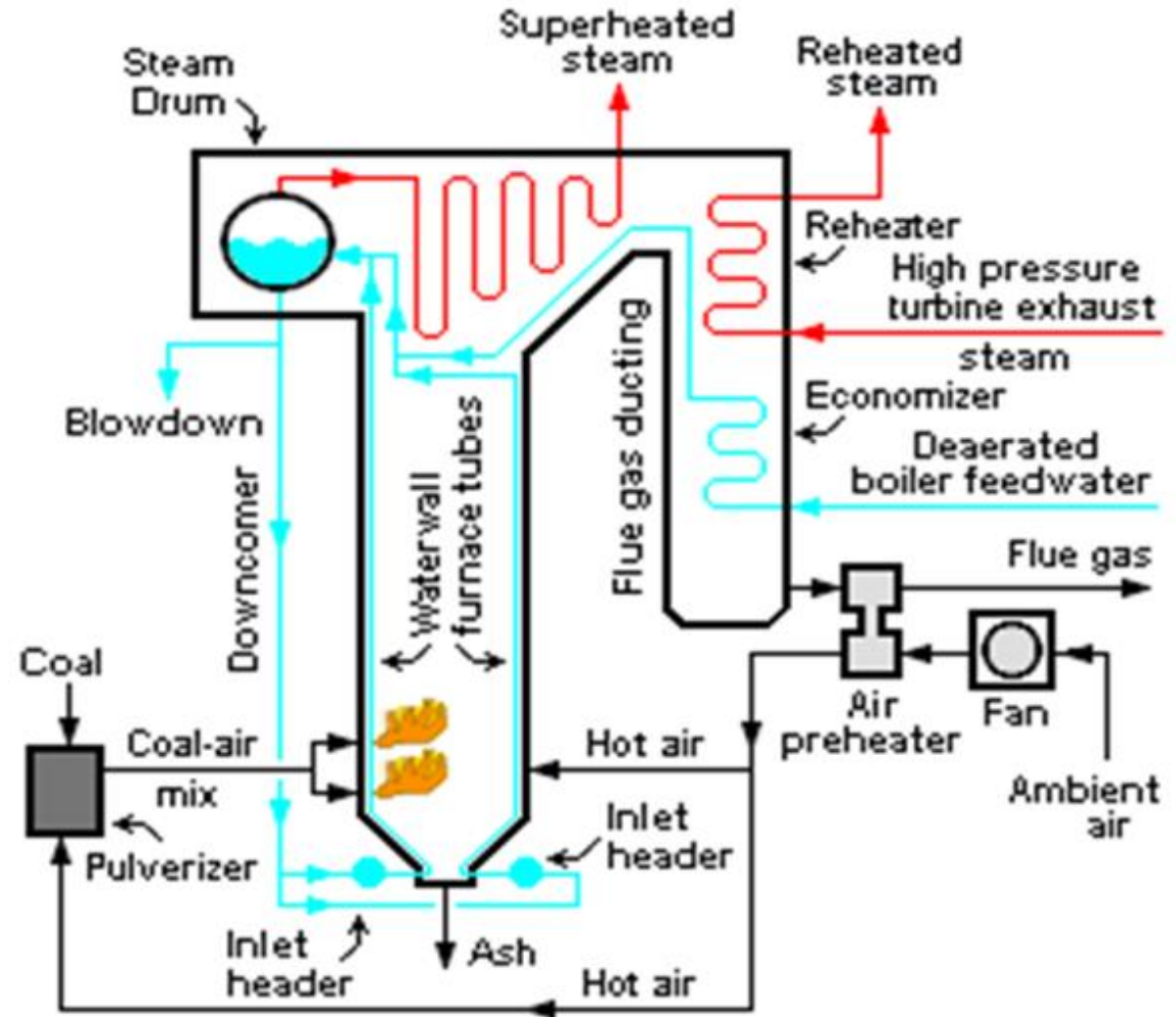
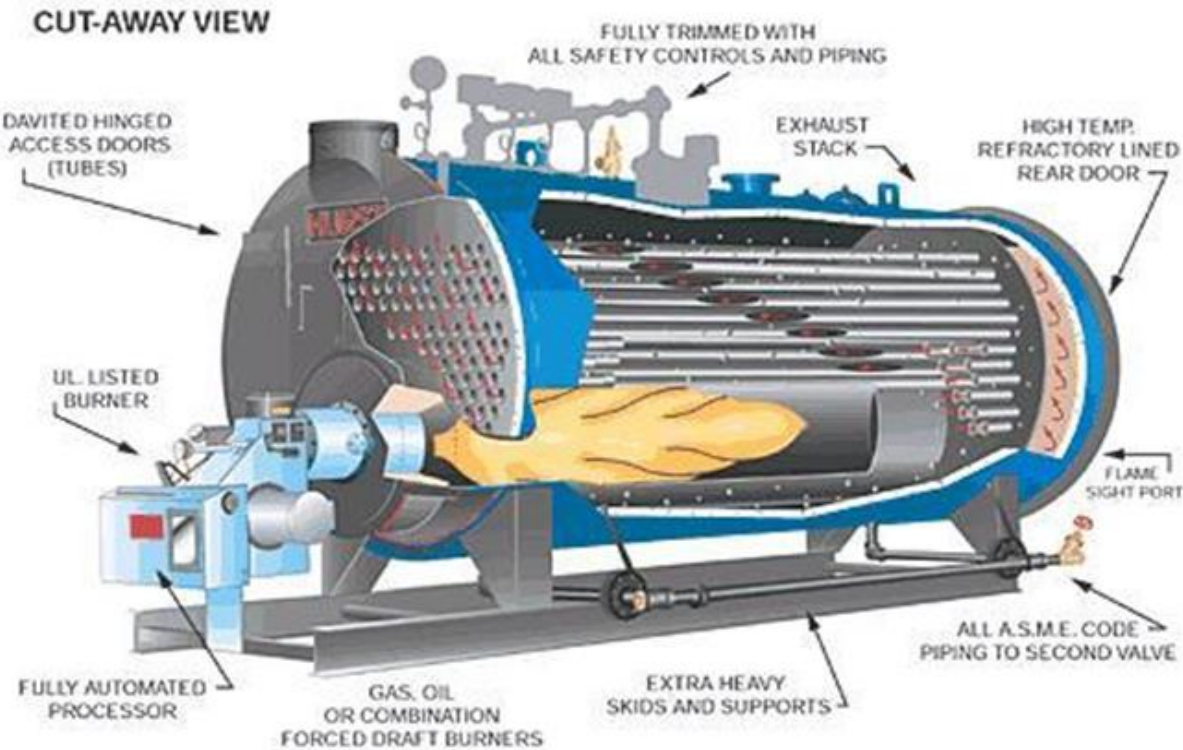


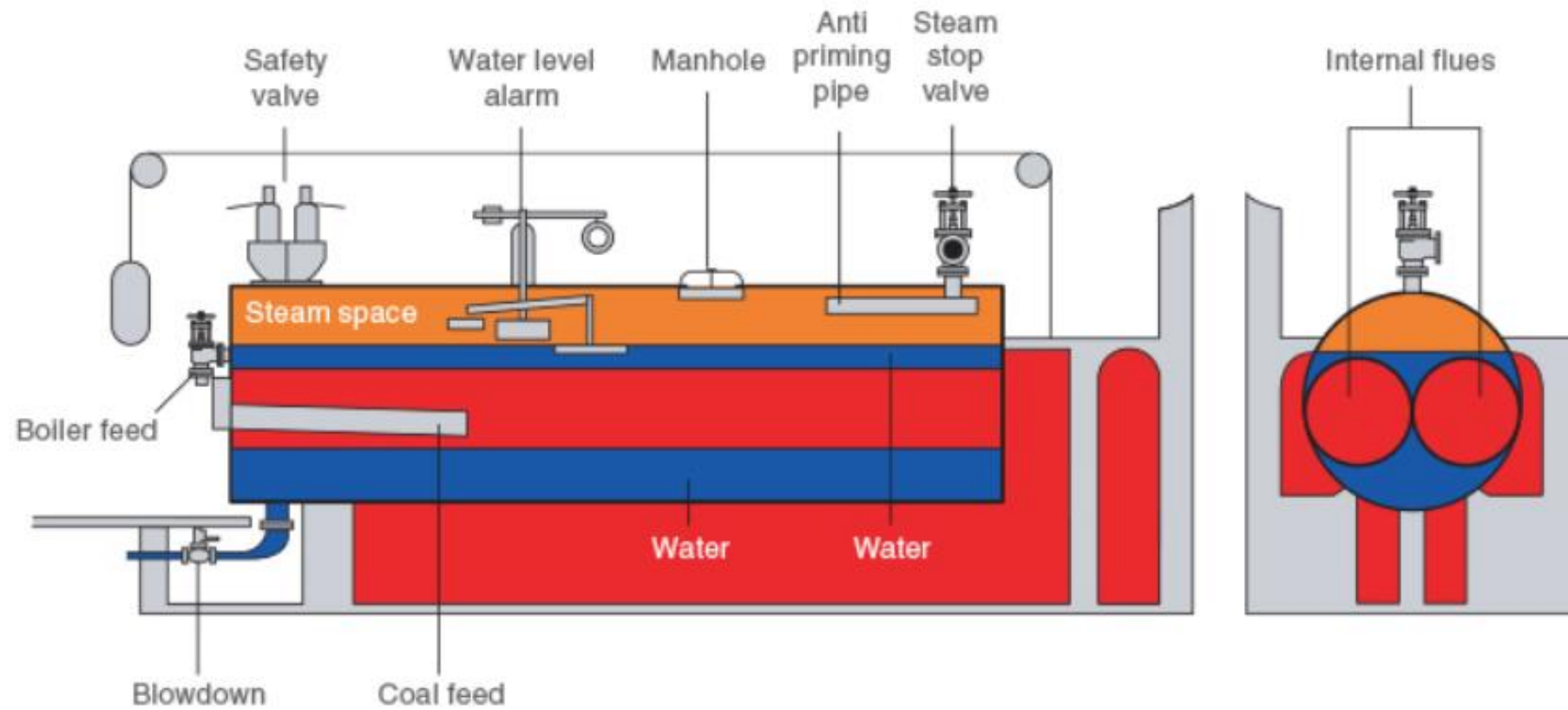
Ατμοπαραγωγοί τύπου λέβητα

Ατμοπαραγωγός τύπου λέβητα (με φλογοσωλήνα και αεριαλούς)

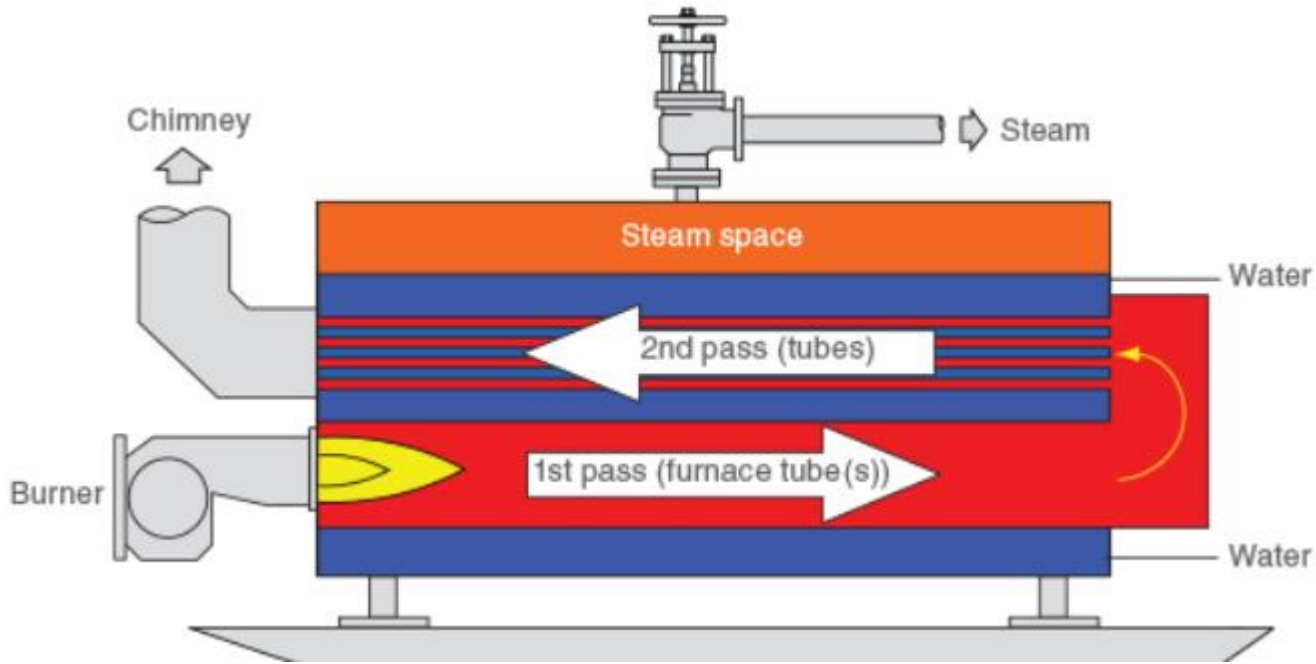
Ατμοπαραγωγός με υδραλούς



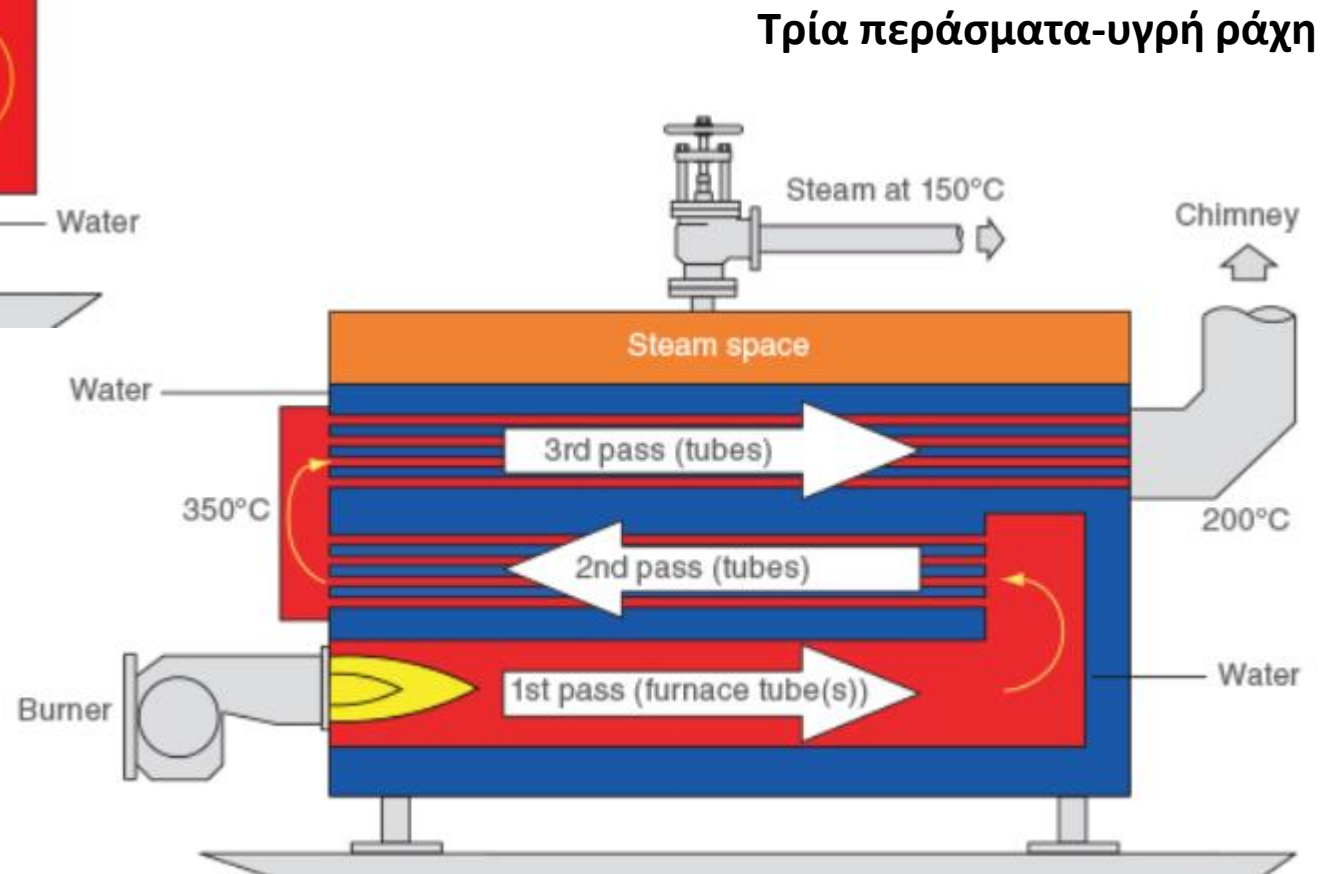
Λέβητας τύπου Lancashire



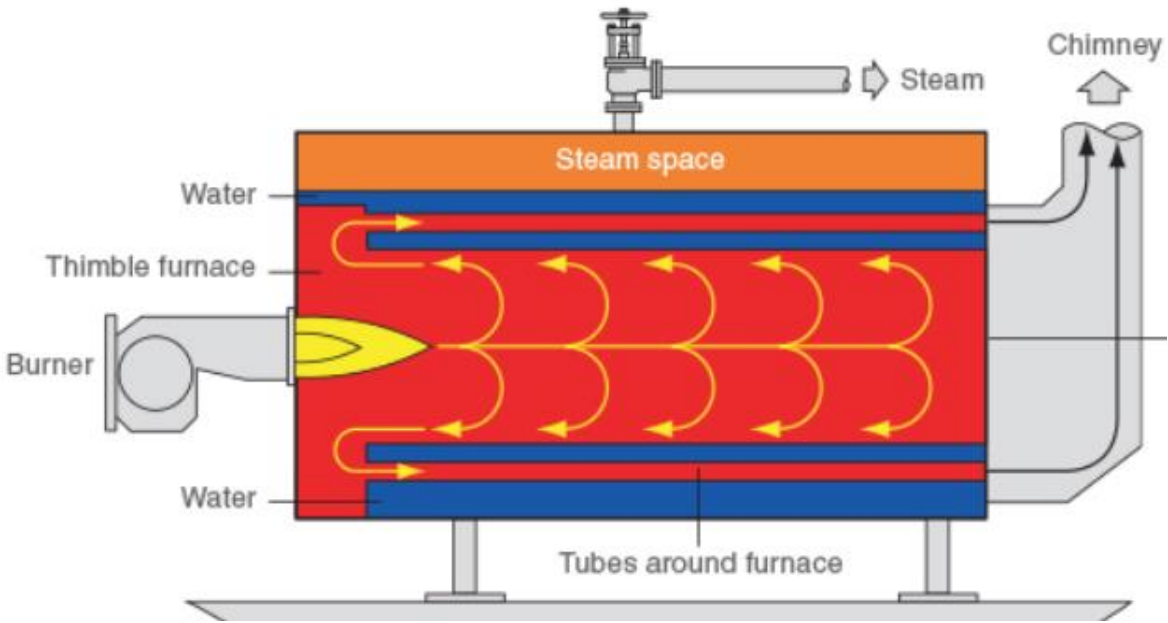
Λέβητας εξοικονόμησης (Economic boiler)



Δύο περάσματα-ξηρά ράχη

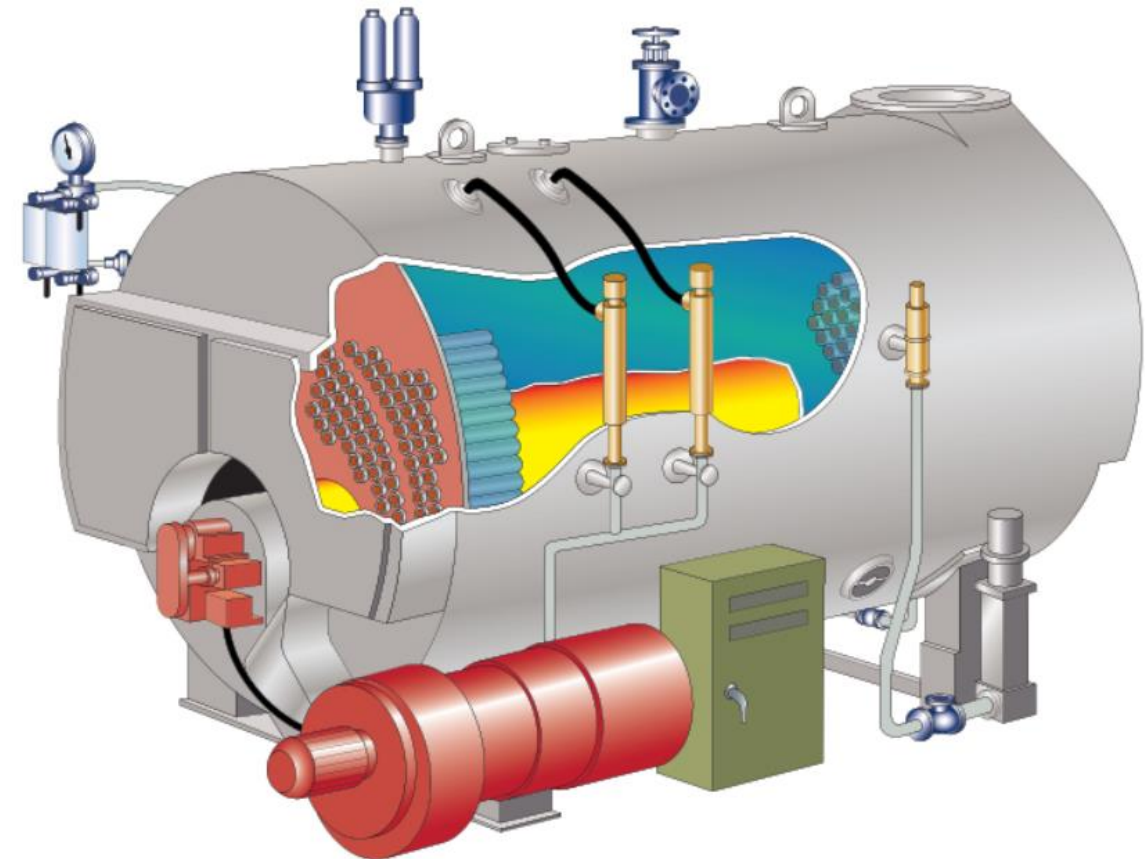


Τρία περάσματα-υγρή ράχη



Λέβητας με αντιστροφή φλόγας

Αυτοματοποιημένος λέβητας (package boiler)



«Απαιτούμενος» όγκος λέβητα:
Θερμική αδράνεια και ευελιξία

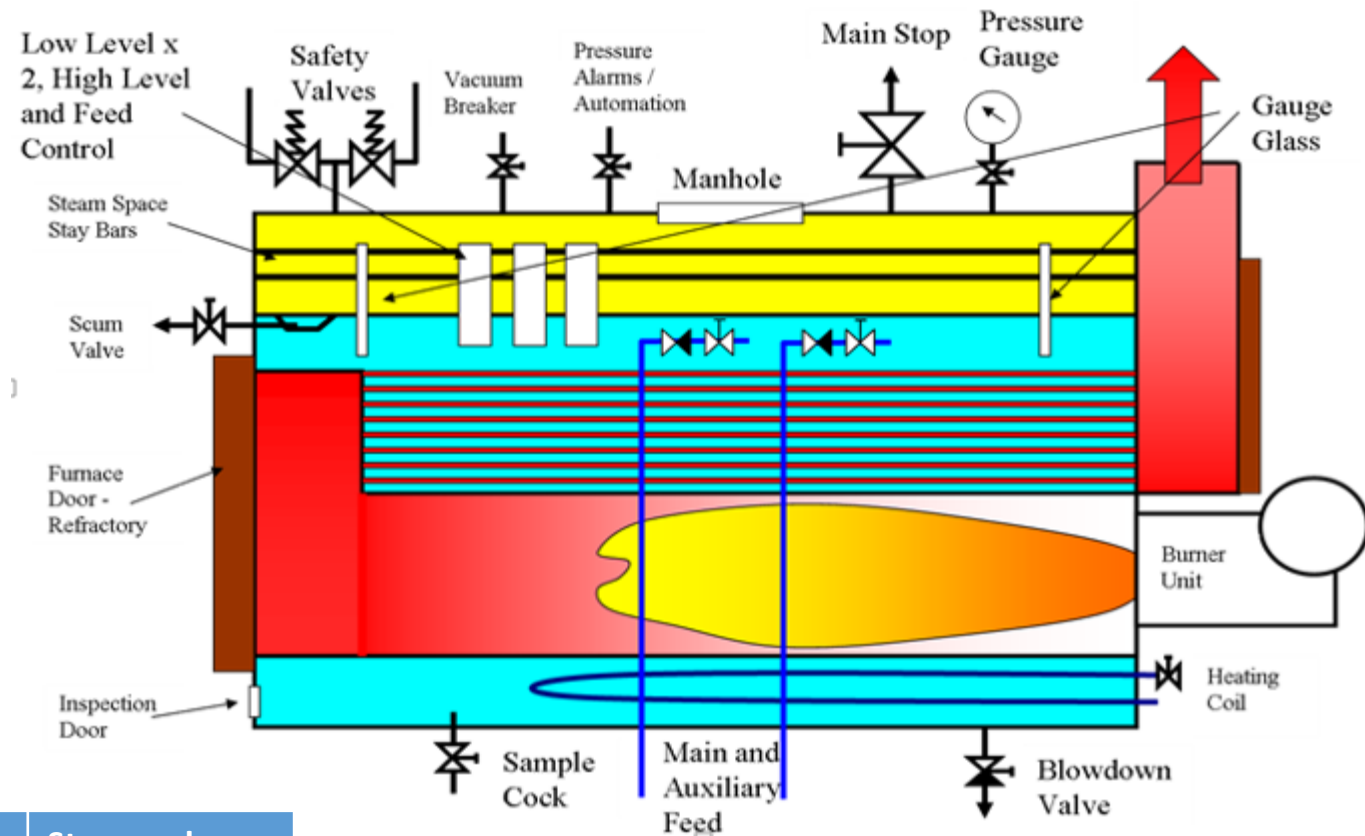
Θερμική φόρτιση όγκου

$$q_V = \frac{Q_{thermal}}{V_{water}}$$

Μαζική ταχύτητα ατμού

$$G_{st} = \frac{\dot{m}_{st}}{A_{interface}}$$

Δυναμικότητα 5000 kg/h



Αυτοματισμοί λέβητα

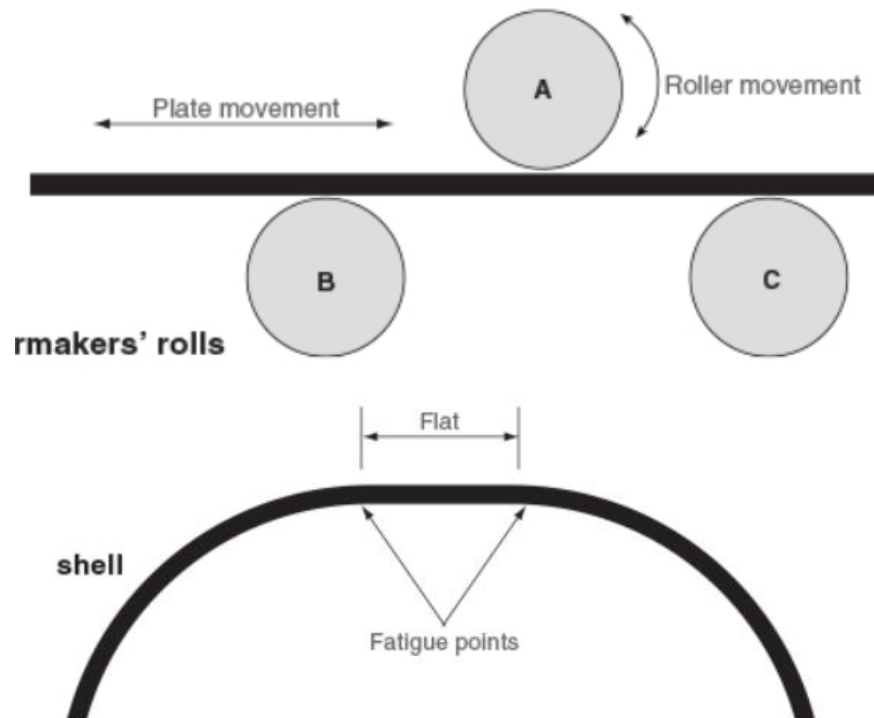
Type	Fuel	Length (m)	Diameter (m)	Thermal efficiency (%)	Volumetric heat (MW/m ³)	Steam release rate (kg/m ² s)
Lancashire	Coal	9,0	2,75	74	0,34	0,07
Economic	Coal	6,0	3,00	76	0,73	0,12
Packaged	Oil	3,9	2,50	82	2,33	0,20
Packaged	Gas	3,9	2,50	80	2,60	0,20

Πάχος ελασμάτων

$$\Delta x = \frac{PD}{2\sigma}$$

$$q = k \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

Κατασκευαστική διαμόρφωση κυλινδρικού λέβητα



Μέγιστο οδικά μεταφερόμενο μέγεθος



$P < 27 \text{ bar}, m_{st} < 27000 \text{ kg/h}$

Ατμοπαραγωγοί με υδραυλούς

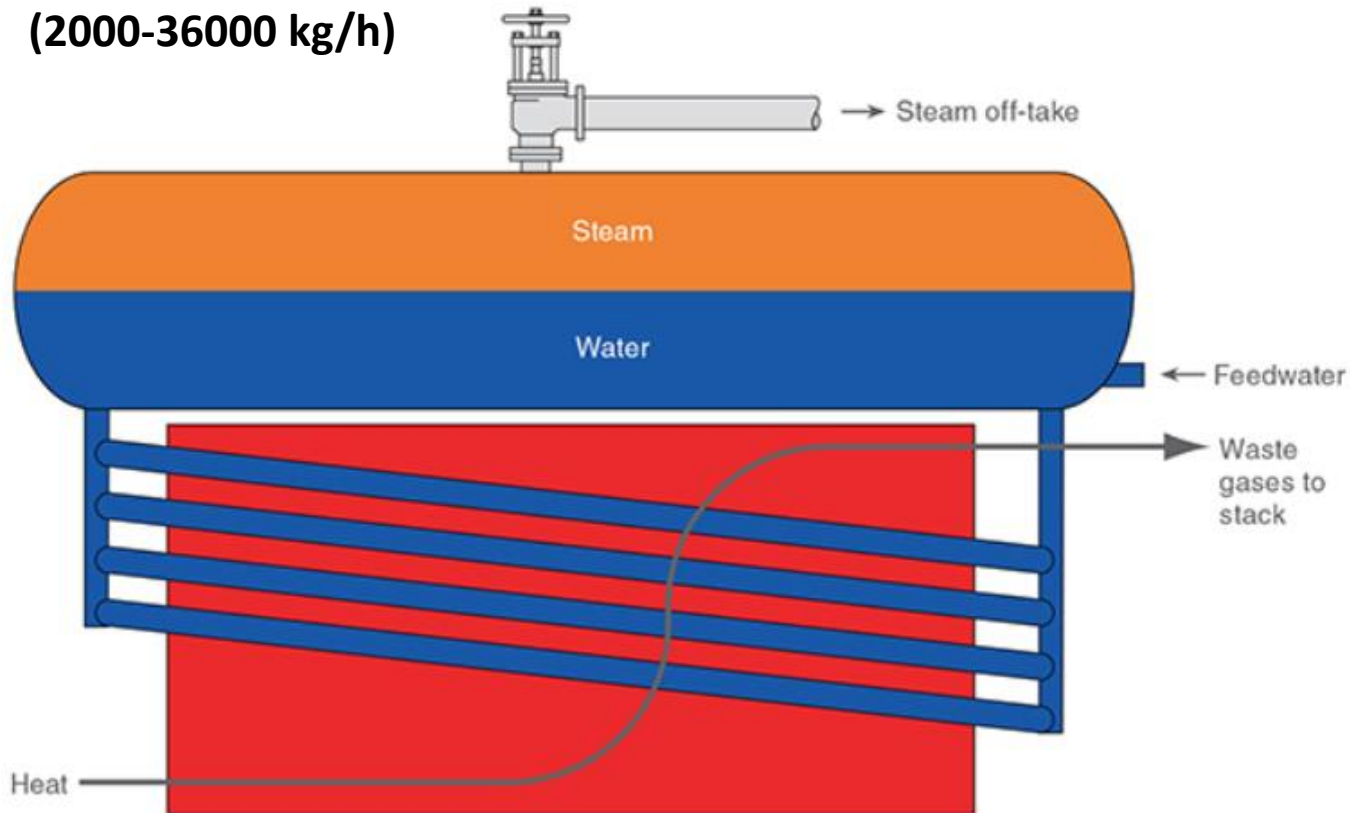
Ατμοπαραγωγοί με υδραυλούς

Στόχοι ανάπτυξης

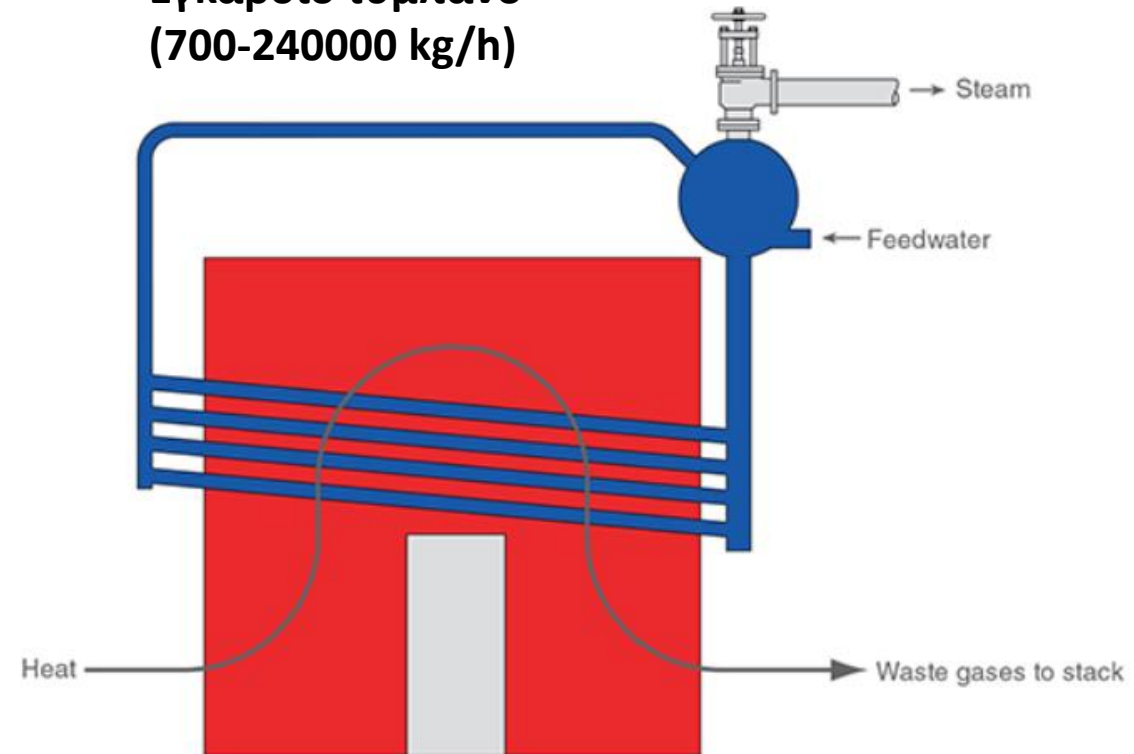
- Μείωση διαμέτρου τυμπάνου
- Φυσική ανακυκλοφορία

$$\Delta x = \frac{PD}{2\sigma}$$

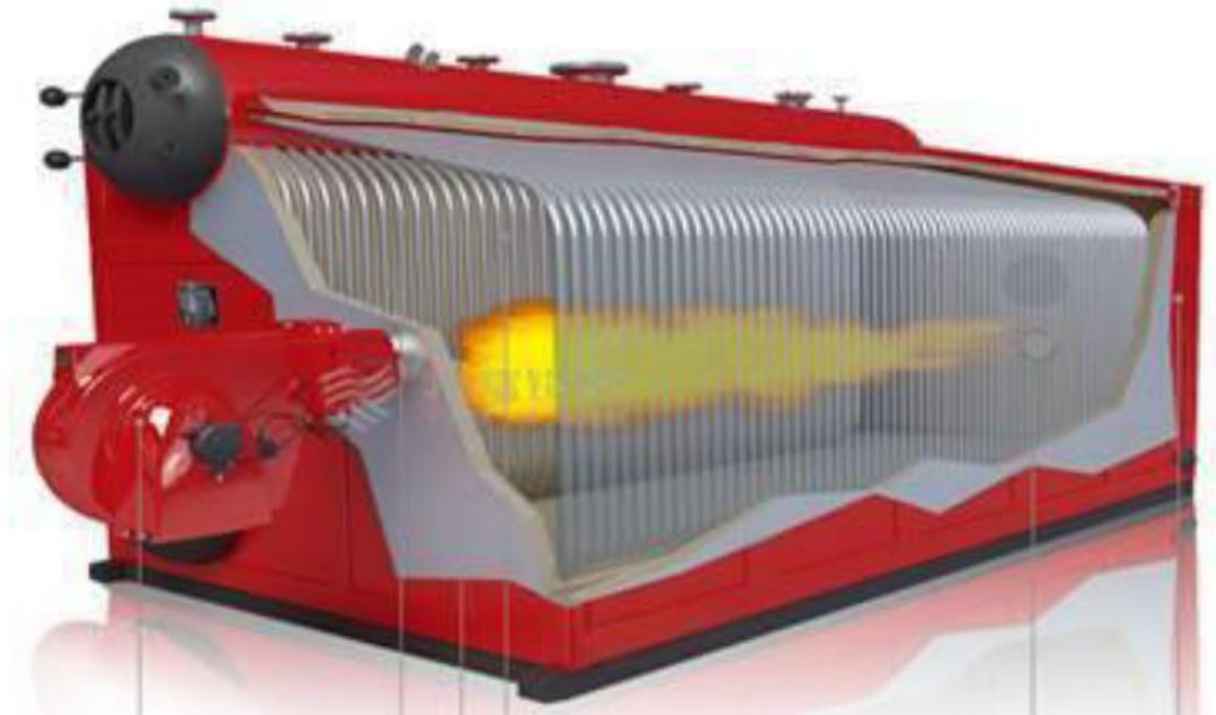
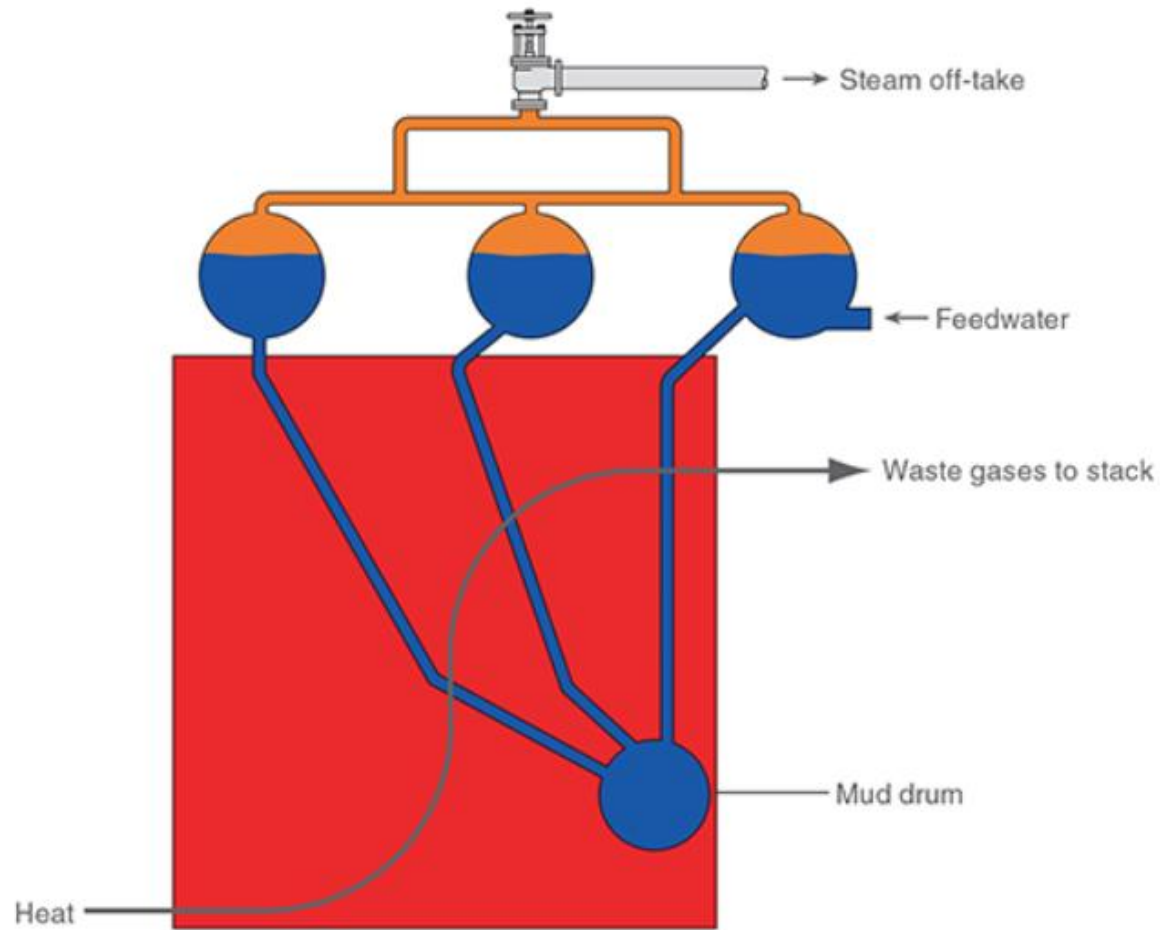
Διαμήκες τύμπανο
(2000-36000 kg/h)



Εγκάρσιο τύμπανο
(700-240000 kg/h)

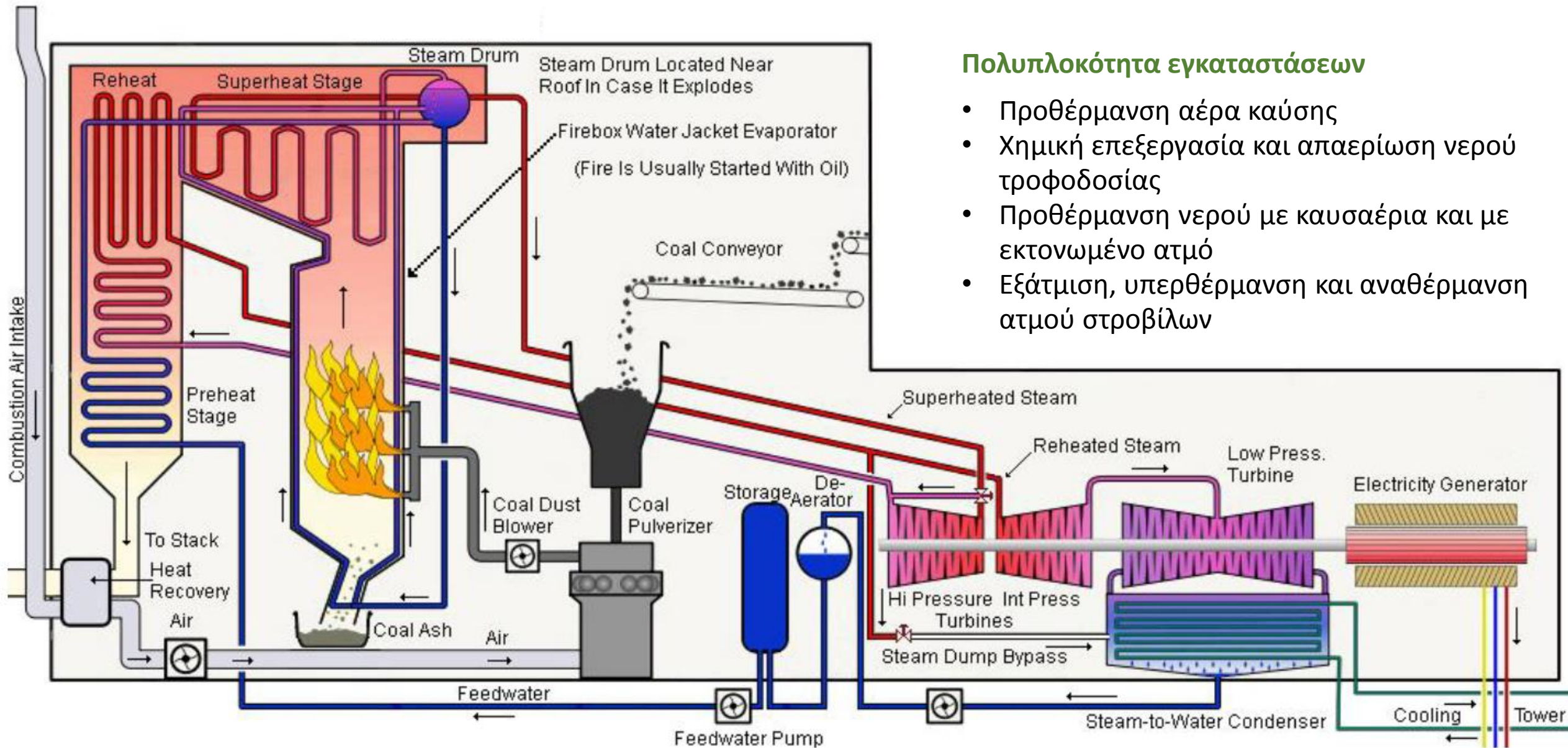


Ατμοπαραγωγός τύπου Sterling



Πλεονεκτήματα ατμοπαραγωγών με υδραυλούς

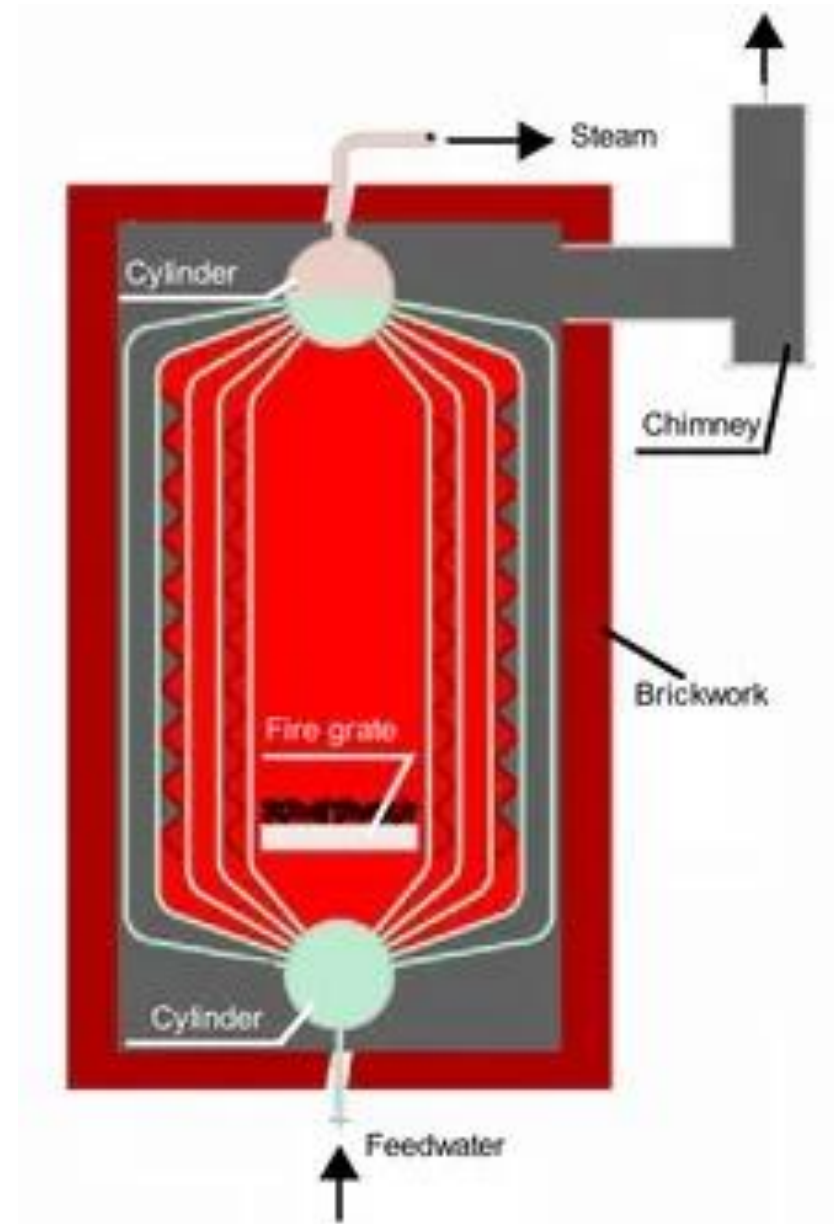
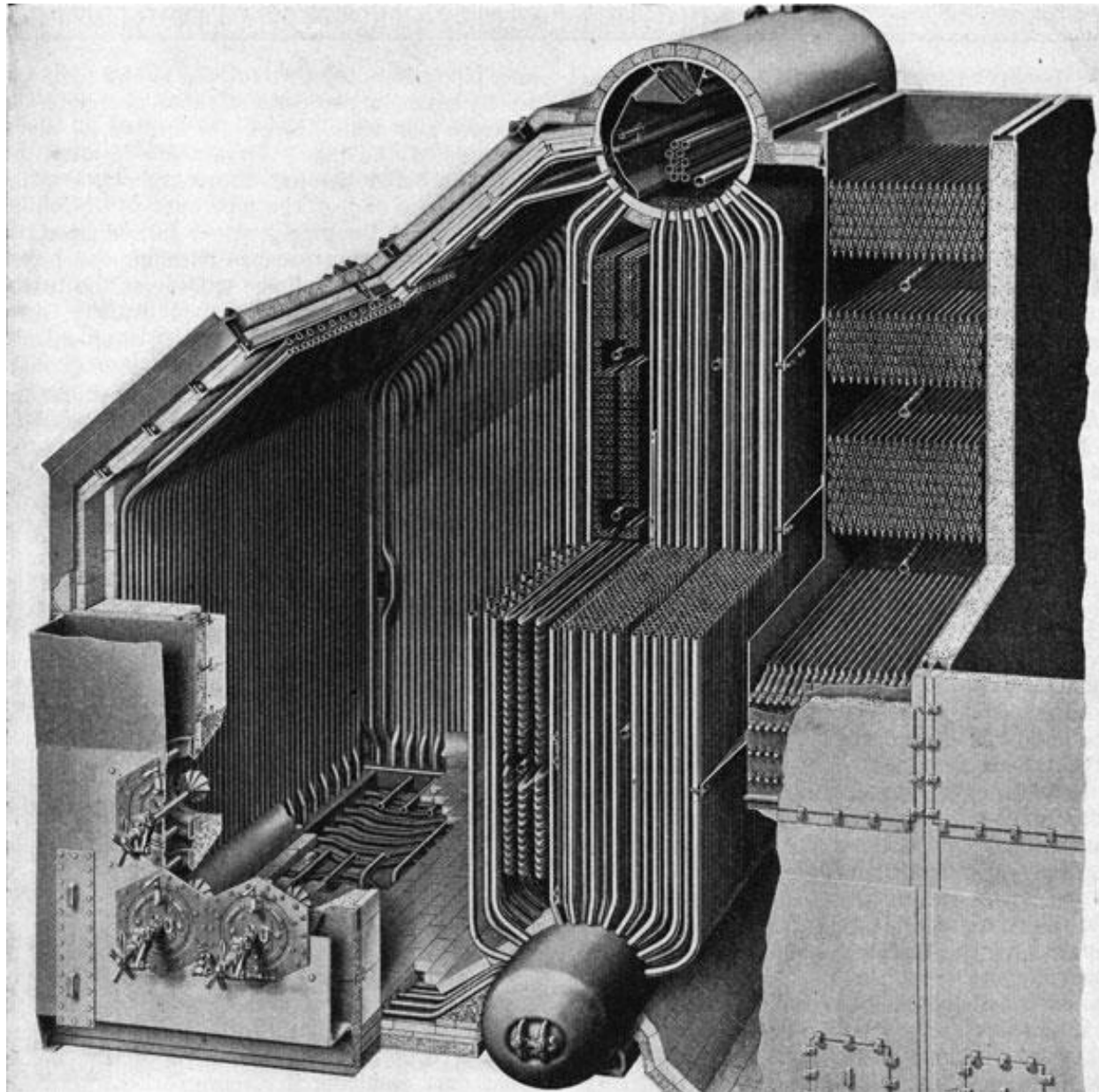
- Μικρός όγκος νερού με αποτέλεσμα γρήγορη απόκριση σε μεταβολές ισχύος και φορτίου
- Η μικρή διάμετρος αυλών και (μικρότερη) τυμπάνου επιτρέπουν υψηλότερες πιέσεις
- Καλύτερος έλεγχος θερμοκρασίας με πολλαπλούς καυστήρες



Πολυπλοκότητα εγκαταστάσεων

- Προθέρμανση αέρα καύσης
- Χημική επεξεργασία και απαερίωση νερού τροφοδοσίας
- Προθέρμανση νερού με καυσαέρια και με εκτονωμένο ατμό
- Εξάτμιση, υπερθέρμανση και αναθέρμανση ατμού στροβίλων

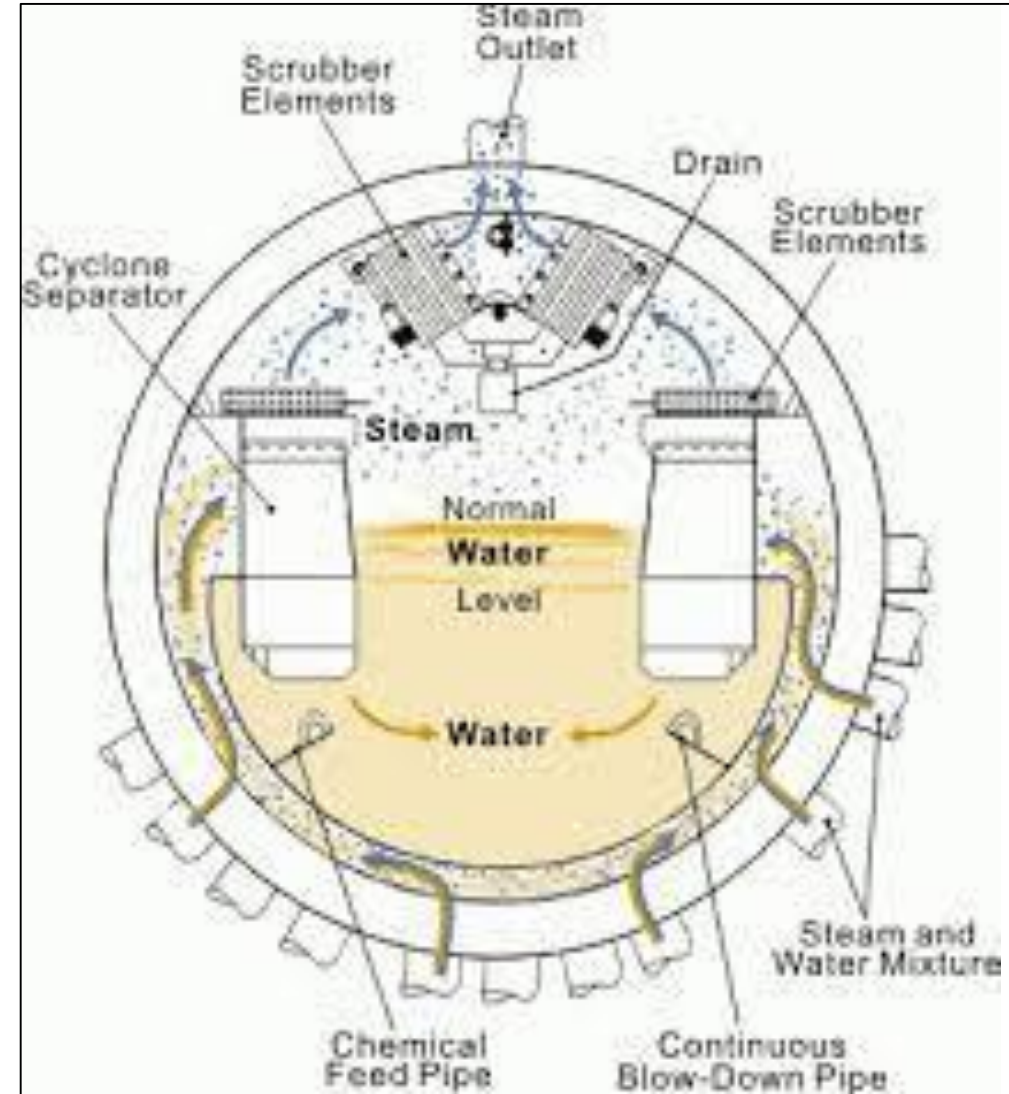
Χώρος ακτινοβολίας



Επιφάνειες εναλλαγής θερμότητας



Διαστάσεις και λειτουργία τυμπάνου



Κυκλοφορία εργαζόμενου μέσου

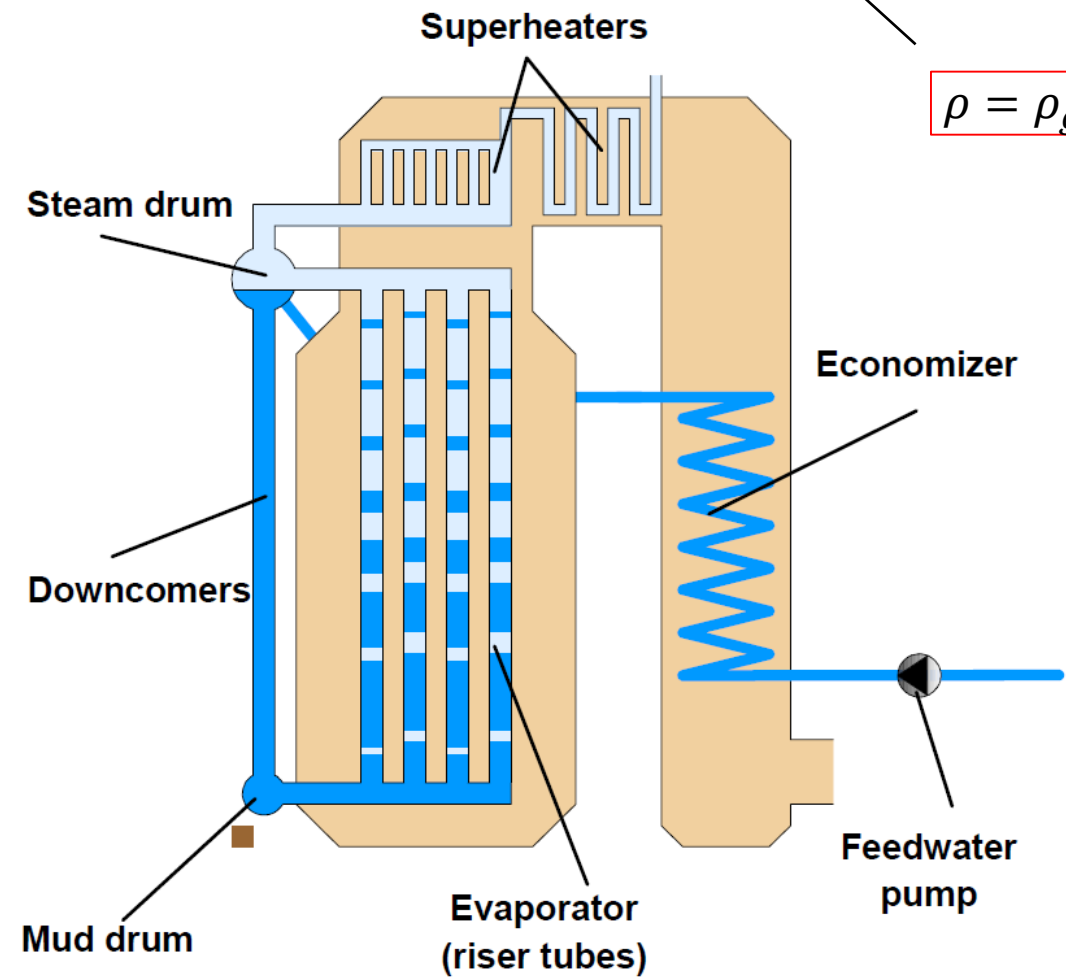
Φυσική ανακυκλοφορία

$P < 70$ bar: $CR = 50-10$, $D = 50-80$ mm

$70 \text{ bar} < P < 160$ bar: $CR = 10-5$

$$\text{Λόγος ανακυκλοφορίας: } CR = \frac{1}{x_{exit}}$$

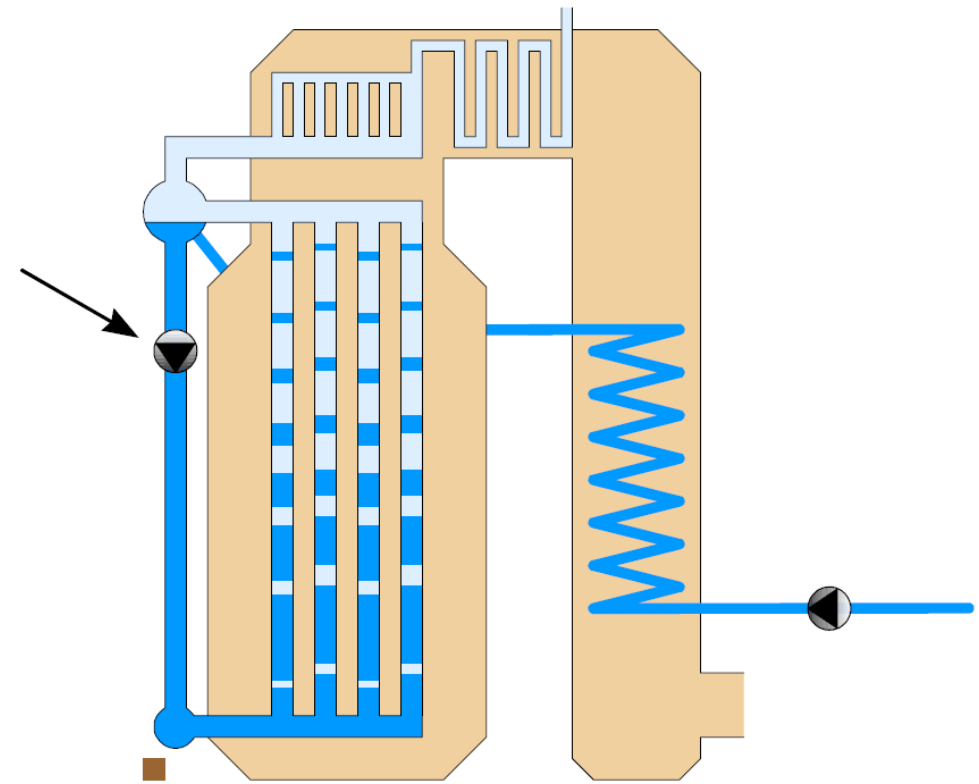
$$\rho = \rho_g \alpha + \rho_l (1 - \alpha)$$



Εξαναγκασμένη ανακυκλοφορία

$P < 200$ bar: $CR = 10-3$, $D = 30-50$ mm

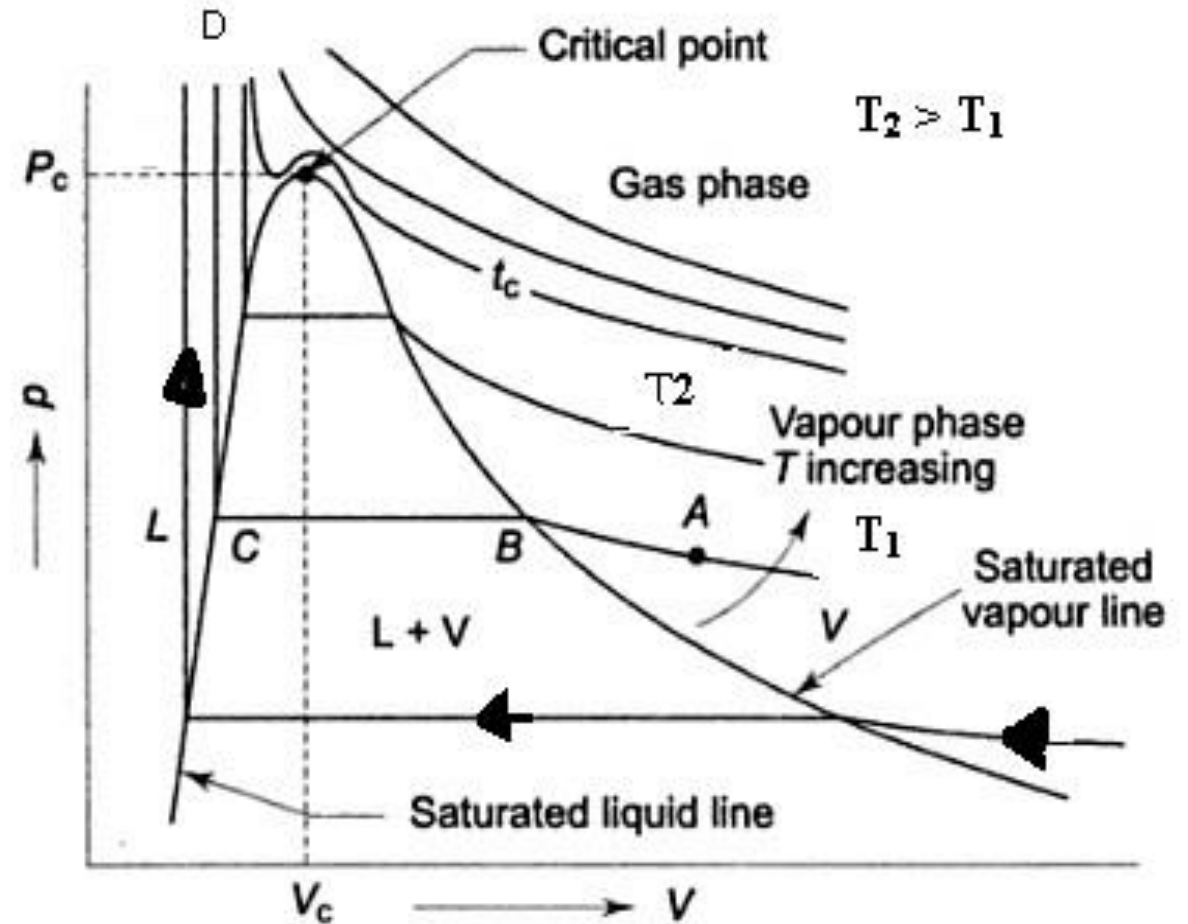
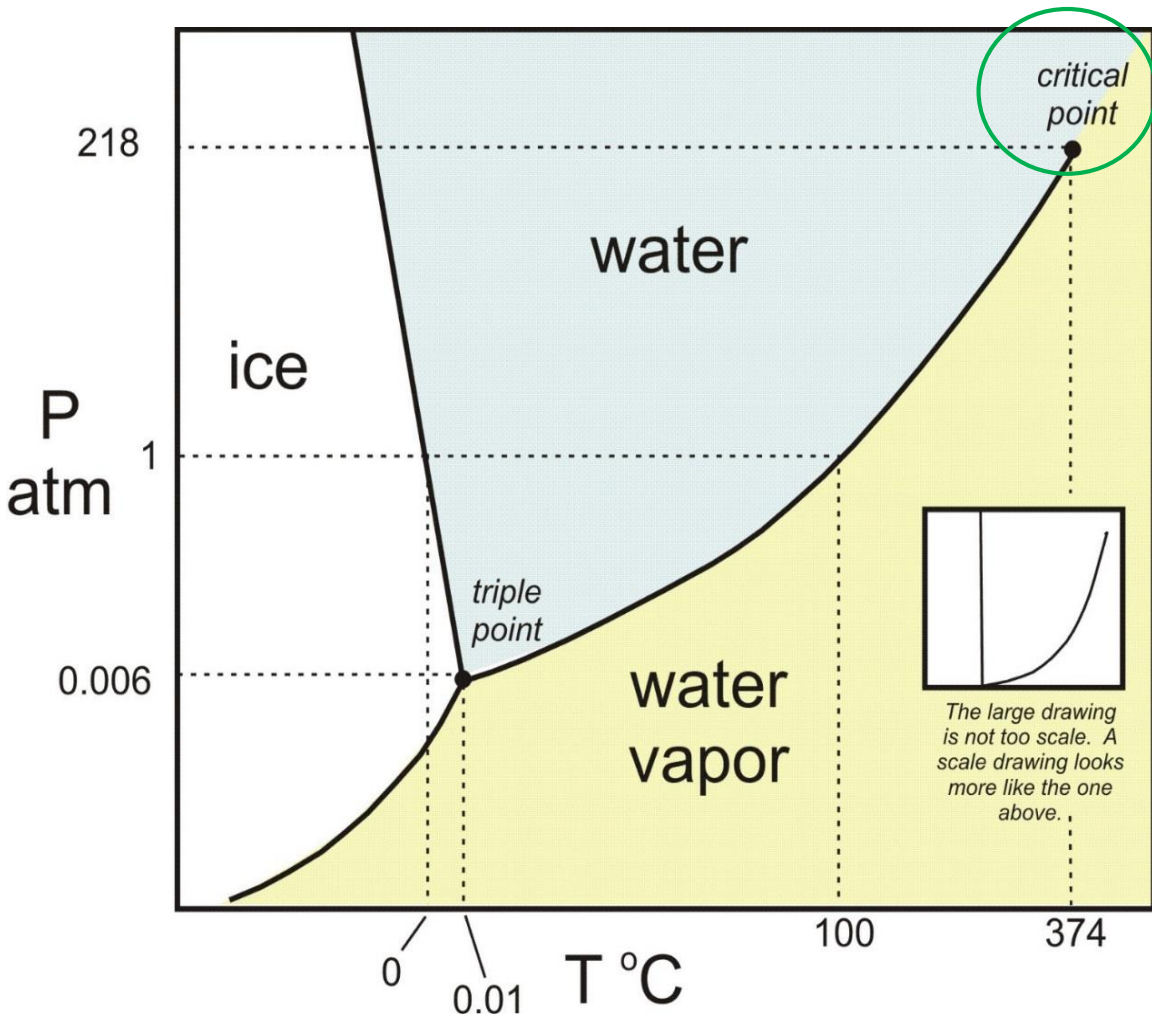
Ισχύς αντλίας: 0,5-1% της παραγόμενης



Κρίσιμες συνθήκες καθαρού συστατικού

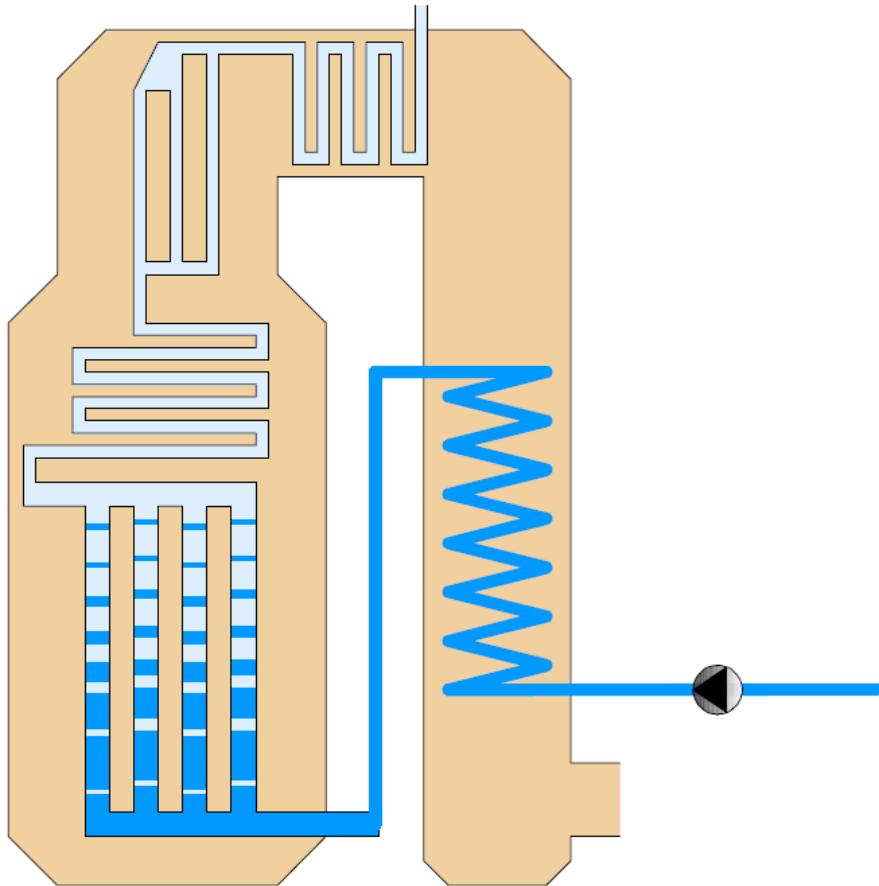
Καμπύλη τάσης ατμών $P^{sat} = f(T)$

Νερό: $P_{cr}=221 \text{ bar}$, $T_{cr}=374 \text{ }^\circ\text{C}$

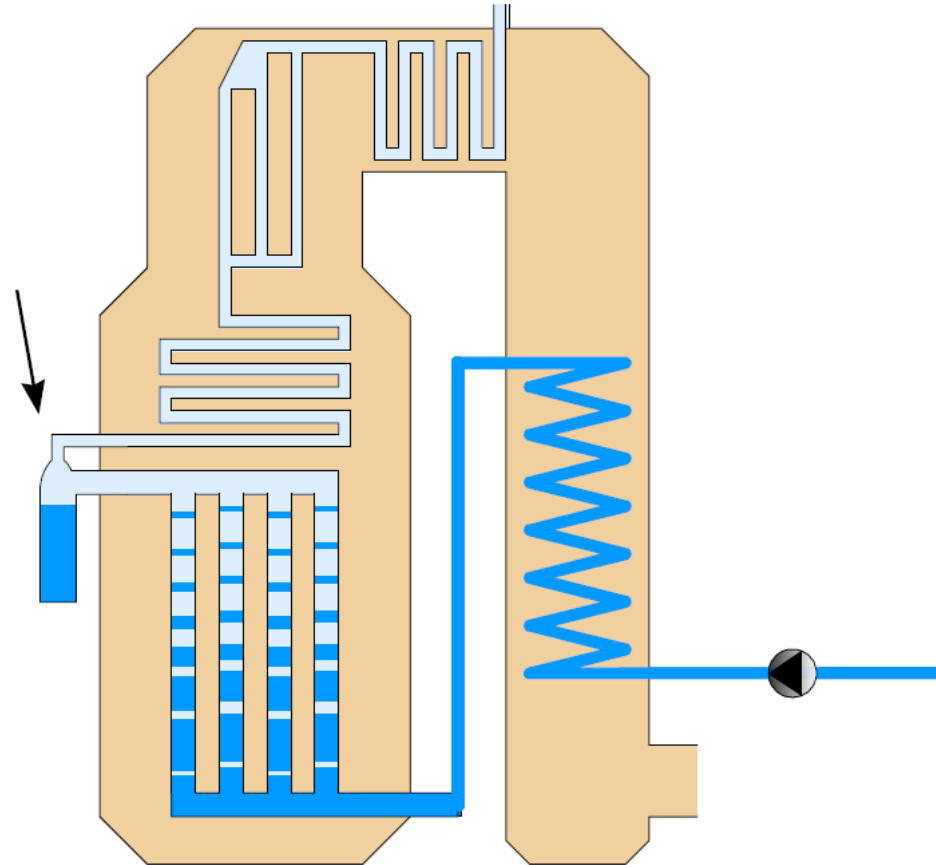


Ατμοπαραγωγοί ενός περάσματος

Τύπος Benson



Τύπος Sulzer



Υπερκρίσιμες συνθήκες

$P=250-300 \text{ bar}$

$T=550-600 \text{ }^\circ\text{C}$

$(P_{cr}=221 \text{ bar}, T_{cr}=374 \text{ }^\circ\text{C})$

Χαρακτηριστικά ροής

$CR=1$

$G>2000 \text{ kg/m}^2\text{s}$

$D=20-30 \text{ mm}$

$\Delta P \sim 30-50 \text{ bar}$

Ελάχιστο εργαζόμενο μέσο -> Εξελεγμένα συστήματα ελέγχου

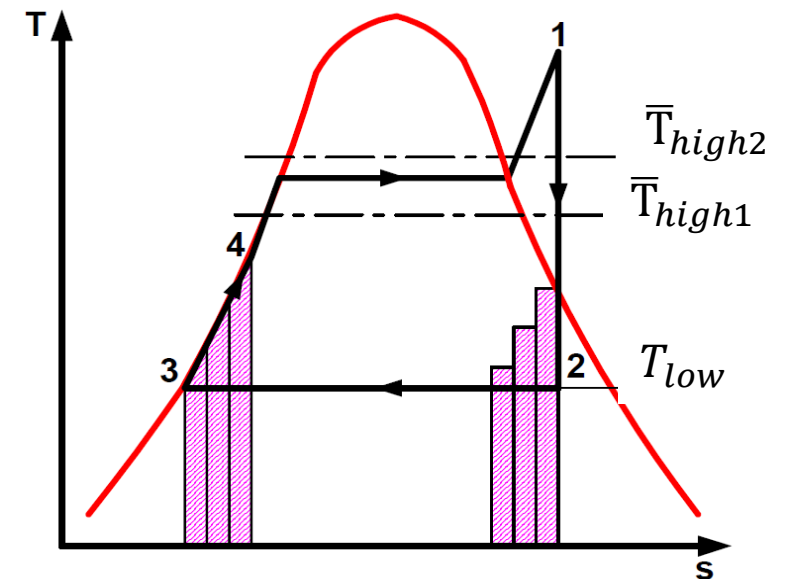
Βαθμός απόδοσης κύκλου Carnot

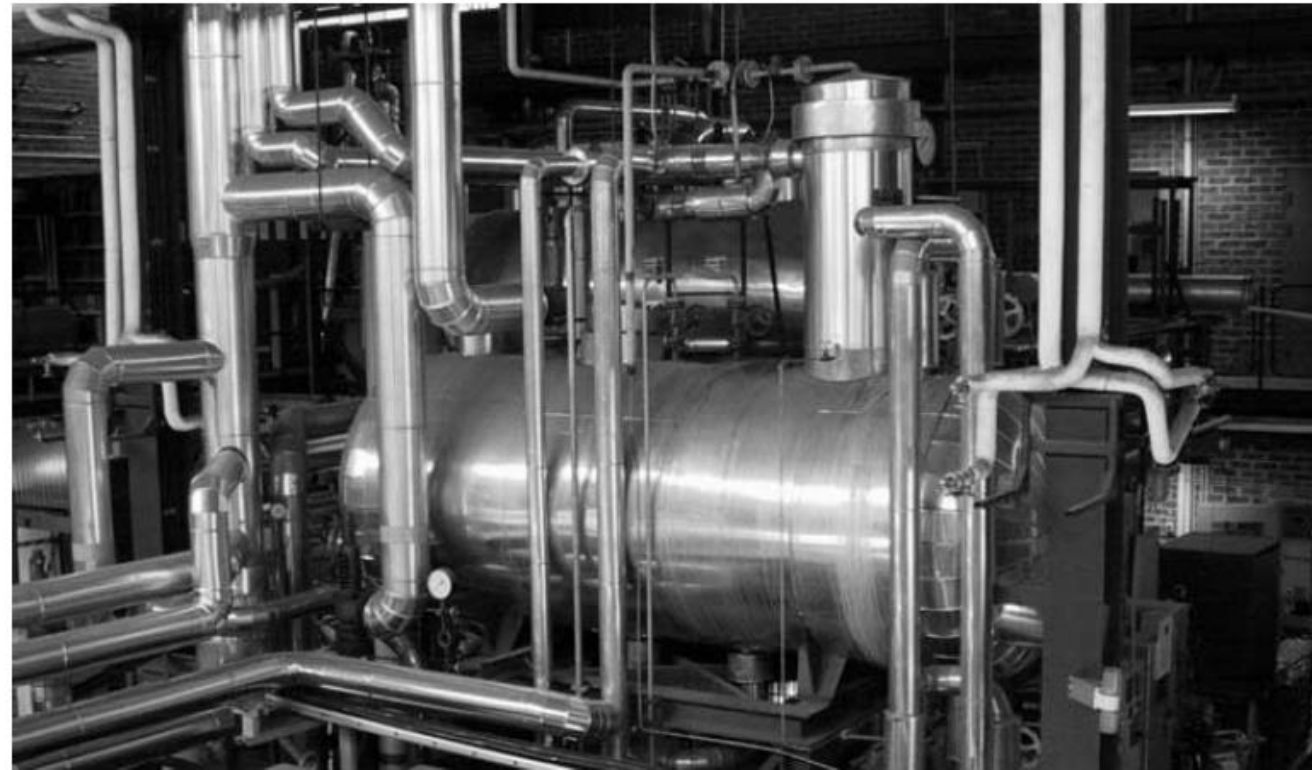
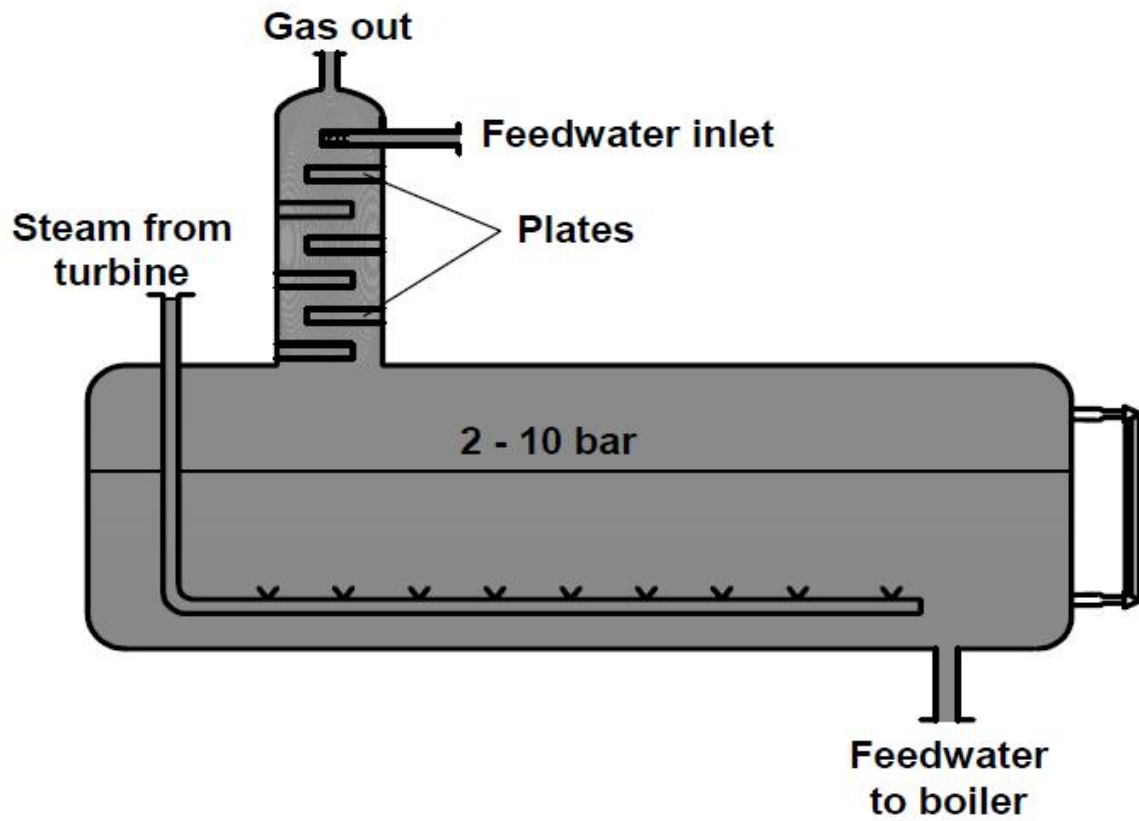
$$\eta \leq 1 - \frac{T_{low}}{\bar{T}_{high}}$$

$$Q = \int_{S_{in}}^{S_{out}} T dS = \bar{T}_{high} (S_{out} - S_{in})$$

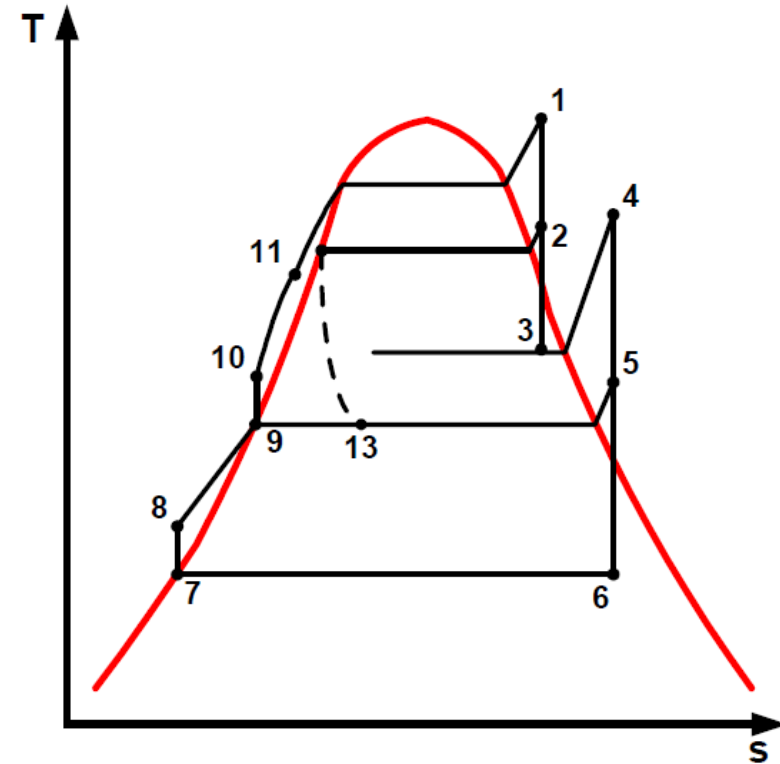
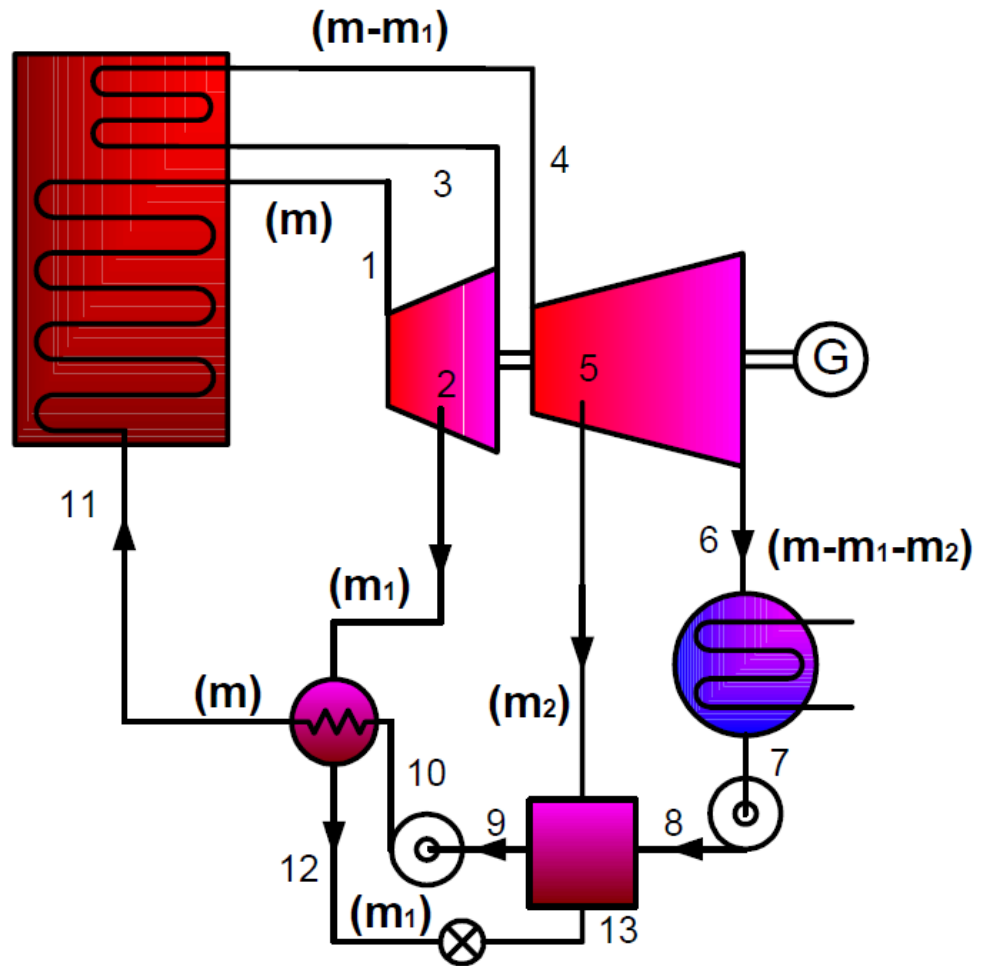
Αύξηση του βαθμού απόδοσης κύκλου Rankine

- Αύξηση πίεσης και θερμοκρασίας υπέρθερμου ατμού
- Ενδιάμεση αναθέρμανση του ατμού
- Ελαχιστοποίηση τελικής θερμοκρασίας και πίεσης στην έξοδο των στροβίλων (νερό ψύξης)
- **Βέλτιστη προθέρμανση νερού τροφοδοσίας (με απομάστευση ατμού από τους στροβίλους)**

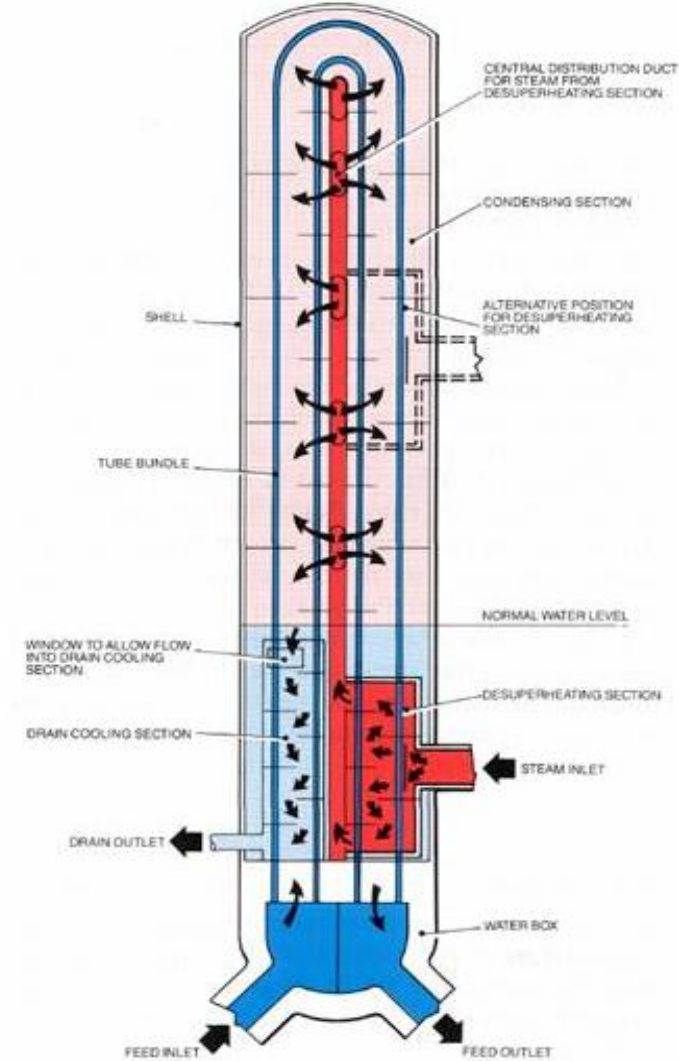
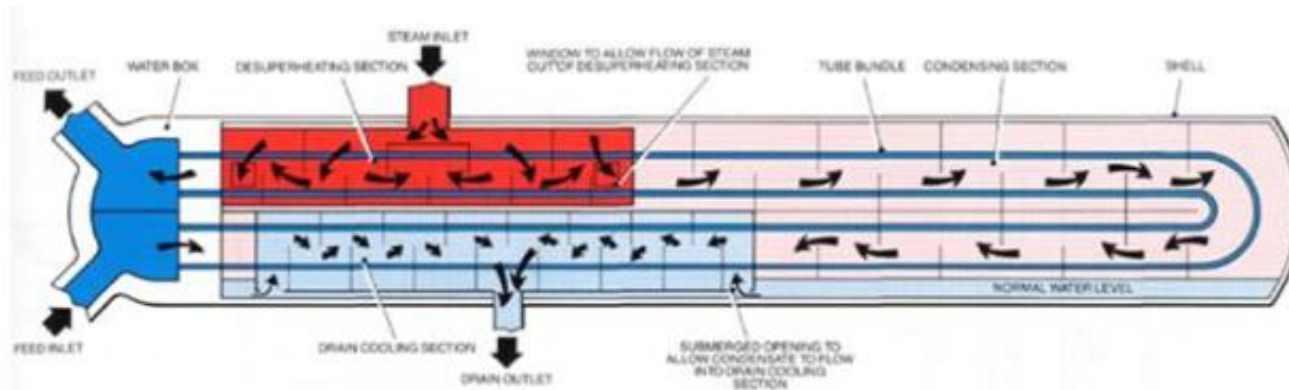
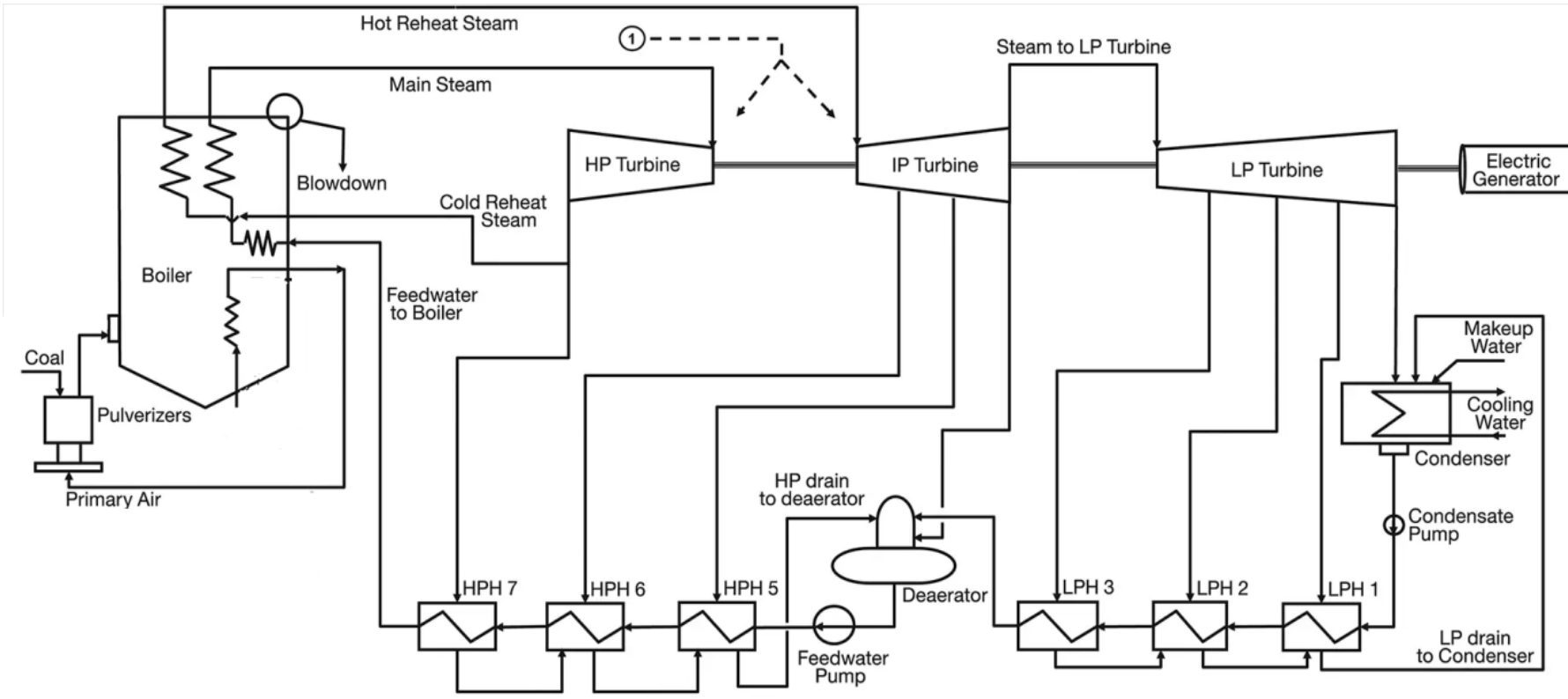




Προθέρμανση νερού τροφοδοσίας



Προθερμαντήρες νερού τροφοδοσίας σε σύγχρονο ΑΗΣ



Θερμικός βαθμός απόδοσης ατμοπαραγωγού

Θερμικές απώλειες ατμοπαραγωγού

$$\eta = \frac{Q_{\text{καυσ}} - Q_G - Q_L - Q_E}{Q_{\text{καυσ}}} = 1 - u_G - u_L - u_E$$

Απώλειες ατελούς καύσης

$$u_E = u_{E0} + u_{E,G} = \frac{m_B - m_{B1}}{m_B} + \frac{y_{CO}}{y_{CO} + y_{CO2}} \frac{23600 C}{H_{LHV}}$$

Απώλειες κελύφους

$$u_L = 10^{-1,6-0,42 \log Q_{\omega\phi}}, \quad Q_{\omega\phi} [=] \text{MW}$$

Απώλειες καυσαερίων

$$u_G = \frac{m_G c_{p,G} (T_G - T_0)}{m_B H_{LHV}} = \frac{\mu_G c_{p,G} (T_G - T_0)}{H_{LHV}}$$

$$\eta = \frac{Q_{\omega\phi}}{Q_{\text{καυσ}}}$$

$$Q_{\text{καυσ}} = m_B H_{LHV} [=] \text{kW}$$

$$Q_{\omega\phi} = m_{st} (H_{st} - H_w) + m_{rst} (H_{r,o} - H_{r,i}) + m_{bd} (H_l - H_w)$$

Στοιχειακή ανάλυση καυσίμου

$$\% \text{wt C, H, O, S} \quad H_{LHV} [=] \text{kJ/kg} \quad (\Delta H_r^0 [=] \text{kJ/mol})$$

Στοιχειομετρικός αέρας καύσης

$$\mu_{A0} = 11,51 C + 34,30 H + 4,31 S - 4,32 O \quad [=] \frac{\text{kg air}}{\text{kg fuel}}$$

Μέτρηση περίσσειας αέρα

$$\lambda - 1 = e = K \frac{\xi}{21 - \xi}$$

$\xi = \% \text{ κατ' όγκο } O_2 \text{ στα ξηρά καυσαέρια}$

Παροχή καυσαερίων

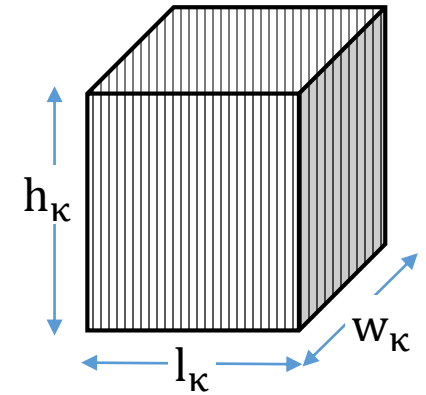
$$\mu_G = \mu_A + 1 = \lambda \mu_{A0} (1 + w) + 1$$

Καύσιμο	K
Carbon	1,0
Hydrogen	0,8
Carbon monoxide	1,21
Sulfur	1,0
Methane	0,9
Oil	0,95
Coal	0,97

Χώρος καύσης/ ακτινοβολίας-Χαρακτηριστικές φορτίσεις

Θερμική φόρτιση όγκου

$$V_{\kappa} = m_B \mu_G v_G t_{\kappa} \Rightarrow q_V = \frac{Q_{ολ}}{V_{\kappa}} = \frac{m_B (H_{LHV} + c_{p,B} T_B + \mu_A c_{p,A} T_A)}{l_{\kappa} w_{\kappa} h_{\kappa}}$$



Θερμική φόρτιση διατομής

$$\left. \begin{aligned} L_f &= m_{B0}^{0,379} [0,36 + 0,128(e^{-16(\lambda-1)} - 1)] \\ D_f &= m_{B0}^{0,387} [0,147 + 0,025(e^{-22(\lambda-1)} - 1)] \end{aligned} \right\}$$

$$q_S = \frac{Q_{ολ}}{S} = \frac{m_B (H_{LHV} + c_{p,B} T_B + \mu_A c_{p,A} T_A)}{l_{\kappa} w_{\kappa}}$$

Θερμική φόρτιση επιφάνειας εναλλαγής

$$q_A = \frac{Q_{ολ}}{A} = \frac{m_B (H_{LHV} + c_{p,B} T_B + \mu_A c_{p,A} T_A)}{2 l_{\kappa} w_{\kappa} + 2 (l_{\kappa} + w_{\kappa}) h_{\kappa}}$$

Μέγιστη θερμική φόρτιση όγκου λέβητα ξηρής τέφρας [=] MW/m³

Καύσιμο / Μέθοδος καύσης	άνθρακας	λιγνίτης	πετρέλαιο	φυσικό αέριο
Καυστήρας	0,10-0,20	0,10-0,15	0,23-0,35	0,35
Εστία καύσης	0,2-0,3	0,2-0,3	-	-
Ρευστοστερεά κλίνη	1,7-2,1	1,7-2,1	-	-

Μέγιστη θερμική φόρτιση διατομής λέβητα ξηρής τέφρας [=] MW/m²

Δυναμικότητα (t/h)	200	400	700-1000	1000-1600
Άνθρακας	2,1-2,7	2,9-4,0	3,3-4,5	4-4,5
Αέριο ή πετρέλαιο	4,1-4,8	4,2-5,2	5,2-6,2	6,0-6,4

Σχεδιασμός χώρου καύσης/ακτινοβολίας

Ισοζύγιο ενέργειας

$$Q = m_G c_{pG} (T_{Ga} - T_{Ge})$$

$$T_{Ge} = ?$$

$$T_{Ga} = \frac{m_B H_{LHV}}{(m_G c_{pG})} = \frac{H_{LHV}}{(\mu_G c_{pG})}$$



Ακτινοβολία προς καθαρά τοιχώματα (γκρίζες επιφάνειες)

$$Q = \frac{\sigma(T_f^4 - T_w^4)}{\frac{1 - \epsilon_f}{\epsilon_f A_f} + \frac{1}{A_f F_{fw}} + \frac{1 - \epsilon_w}{\epsilon_w A_w}} = \sigma \epsilon A_w (T_f^4 - T_w^4) \approx \sigma \epsilon A_w T_f^4, \quad \epsilon = \left(\frac{1}{\epsilon_f} + \frac{1}{\epsilon_w} - 1 \right)^{-1}$$

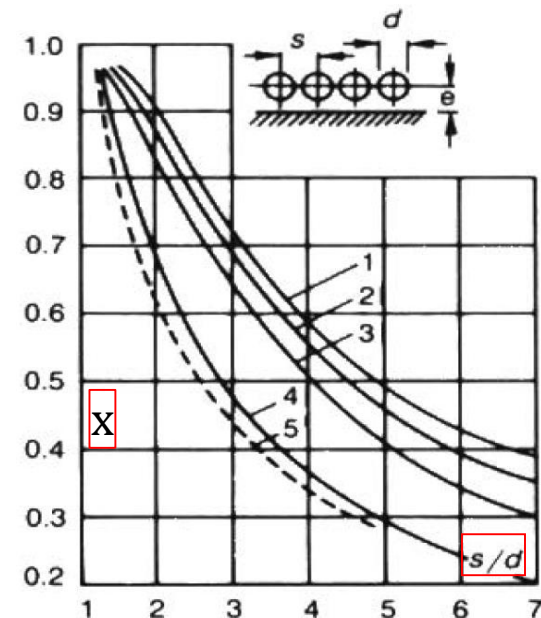
Ακτινοβολία προς τοιχώματα με επικαθήσεις

$$\psi = \frac{J_1 - J_2}{J_1} = x \xi$$

$\xi = 0,65$ αέριο καύσιμο
 $0,55$ υγρό καύσιμο
 $0,4-0,5$ άνθρακας
 $0,1-0,2$ κεραμική επικάλυψη

$$J_1 = \epsilon_f \sigma T_f^4 + (1 - \epsilon_f) J_2 \Rightarrow$$

$$Q = \epsilon_F \psi A_w \sigma T_f^4 \quad \epsilon_F = \frac{\epsilon_f}{\epsilon_f + (1 - \epsilon_f) \psi}$$



1: $e > 1,4d$, 2: $e = 0,8d$, 3: $e = 0,5d$, 4: $e = 0$

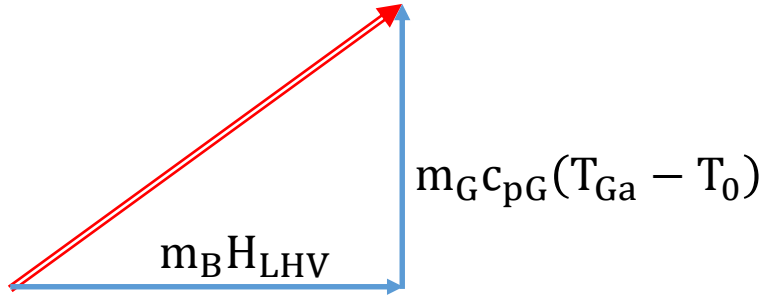
Μέση θερμοκρασία φλόγας

$$T_f = \sqrt{T_{Ga} T_{Ge}}$$

Τελική σχεδιαστική σχέση

$$\left(\frac{T_{Ge}}{T_{Ga}} \right)^2 = Bo \left(1 - \frac{T_{Ge}}{T_{Ga}} \right) \quad Bo = \frac{m_G c_{p,G}}{\sigma \epsilon A_w T_{Ga}^3} \quad \eta \quad Bo = \frac{m_G c_{p,G}}{\sigma \epsilon_F \psi A_w T_{Ga}^3}$$

Αδιαβατική θερμοκρασία φλόγας



$$Q = m_G c_{pG} (T_{Ga} - T_0) + m_B (-H_{LHV}) = 0$$

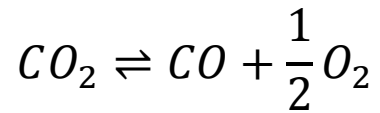
Γκρίζες επιφάνειες: $\varepsilon = \alpha \neq \varepsilon$ (μήκος κύματος)

$$\left. \begin{aligned} \psi &= \frac{J_1 - J_2}{J_1} = x \xi \Rightarrow J_2 = (1 - \psi) J_1 \\ J_1 &= \varepsilon_f \sigma T_f^4 + (1 - \varepsilon_f) J_2 \end{aligned} \right\} \Rightarrow J_1 = \frac{\varepsilon_f \sigma T_f^4}{\varepsilon_f + (1 - \varepsilon_f) \psi}$$

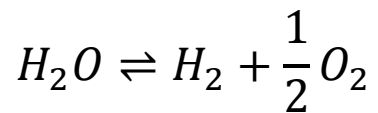
$$Q = (J_1 - J_2) A_w = \psi J_1 A_w = \varepsilon_F \psi A_w \sigma T_f^4$$

$$\varepsilon_F = \frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_f + (1 - \varepsilon_f) \psi} \quad \text{βαθμός εκπομπής θαλάμου καύσης}$$

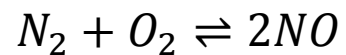
Αντιδράσεις καύσης: Χημική ισορροπία-Χημική κινητική



- Λόγος αέρα, λ / λόγος ισοδυναμίας, ϕ



- $\lambda > 1,1$ και $T_g < 1000^\circ C$ -> πλήρης καύση



- Φτωχό ή πλούσιο μίγμα (μέση τιμή / τοπικές τιμές)

- Φλόγα προανάμιξης ή φλόγα διάχυσης

- Σχηματισμός και διατήρηση ρύπων

Τελική σχεδιαστική σχέση

$$Q = m_G c_{pG} (T_{Ga} - T_{Ge}) = \varepsilon_F \psi A_w \sigma T_{Ga}^2 T_{Ge}^2 \Rightarrow$$

$$\left(\frac{T_{Ge}}{T_{Ga}} \right)^2 = Bo \left(1 - \frac{T_{Ge}}{T_{Ga}} \right)$$

$$Bo = \frac{m_G c_{p,G}}{\sigma \varepsilon_F \psi A_w T_{Ga}^3}$$

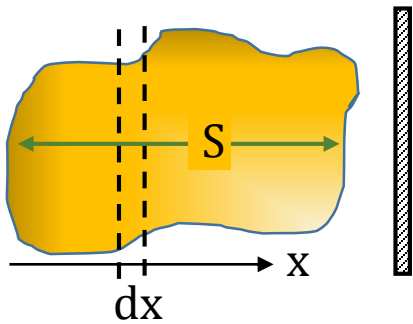
Βαθμός εκπομπής φλόγας και καυσαερίων

Θερμική ακτινοβολία

O₂, N₂, H₂O, CO₂, SO₂, αιθάλη, κωκ, τέφρα

Βαθμός απορρόφησης-εκπομπής καυσαερίων

Χαρακτηριστική διάσταση φλόγας: $S = 3,6 \frac{V_f}{A_f}$



$$dI = -k_f P I(x) dx \Rightarrow I(S) = I_0 e^{-k_f P S}$$

k_f : συντελεστής απόσβεσης φλόγας

P : πίεση σε MPa

$$\varepsilon_f = a_f = \frac{I_0 - I(S)}{I_0} = 1 - e^{-k_f P S}$$

Πρόβλεψη βαθμού εκπομπής

$$\varepsilon_f = x_{lum}(1 - e^{-k_{lum} P S}) + (1 - x_{lum})(1 - e^{-k_{non} P S})$$

Κλάσμα φωτεινού τμήματος: $x_{lum} = 0,55$ (πετρέλαιο)

$x_{lum} = 0,10$ (φυσικό αέριο)

φωτεινό τμήμα καυσαερίων: $k_f \equiv k_{lum} = k_{Gr} + k_s$

μη-φωτεινό τμήμα καυσαερίων: $k_f \equiv k_{non} = k_{Gr}$

Συντελεστής απόσβεσης αερίων

$$k_{Gr} = 10 \left[\frac{0,78 + 1,6r_{H_2O}}{(10 P S r)^{1/2}} - 0,1 \right] \left(1 - 0,37 \frac{T_{Ge}}{1000} \right) r$$

Συντελεστής απόσβεσης αιθάλης

$$k_s = 0,3(1 - e) \left(1,6 \frac{T_{Ge}}{1000} - 0,5 \right) \left(\frac{C}{H} \right)_B$$

r : κλάσμα όγκου αερίων

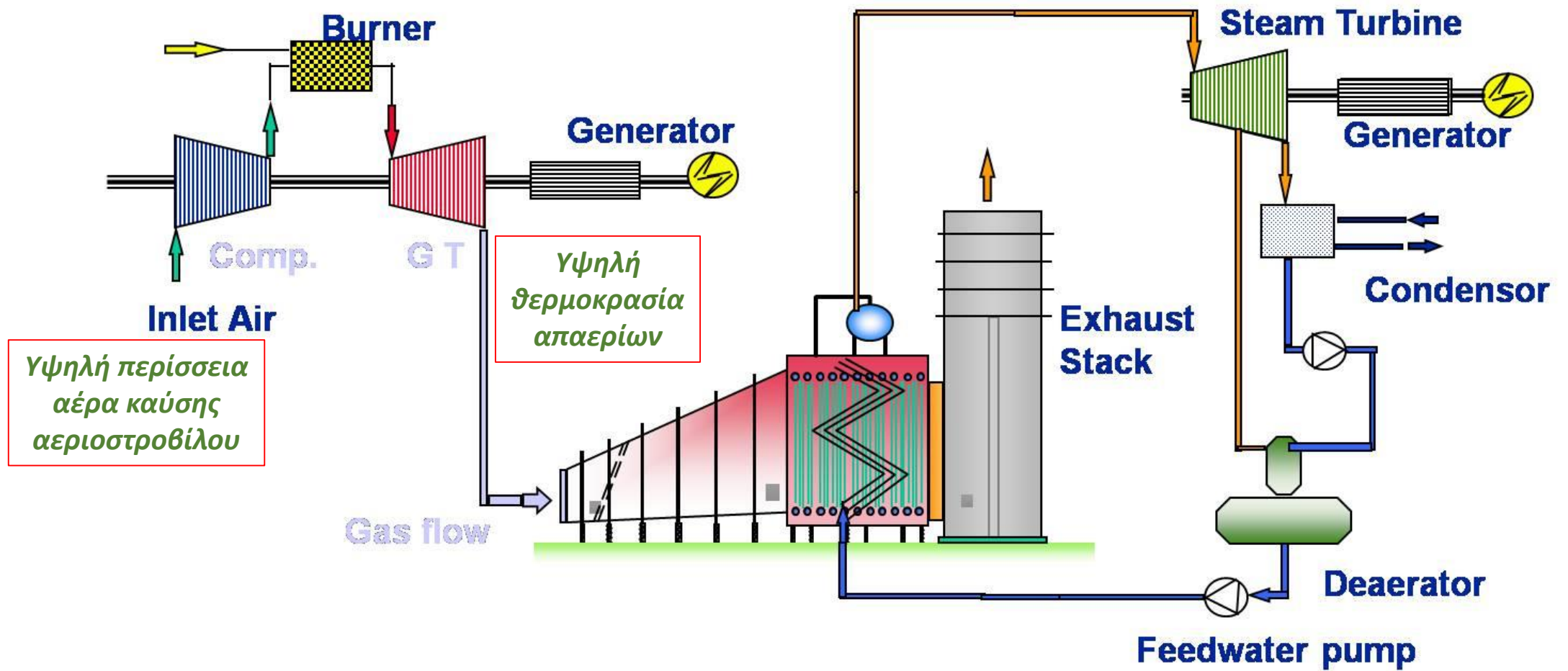
T_{Ge} : θερμοκρασία[=]K

S : [=]m, P : [=]MPa

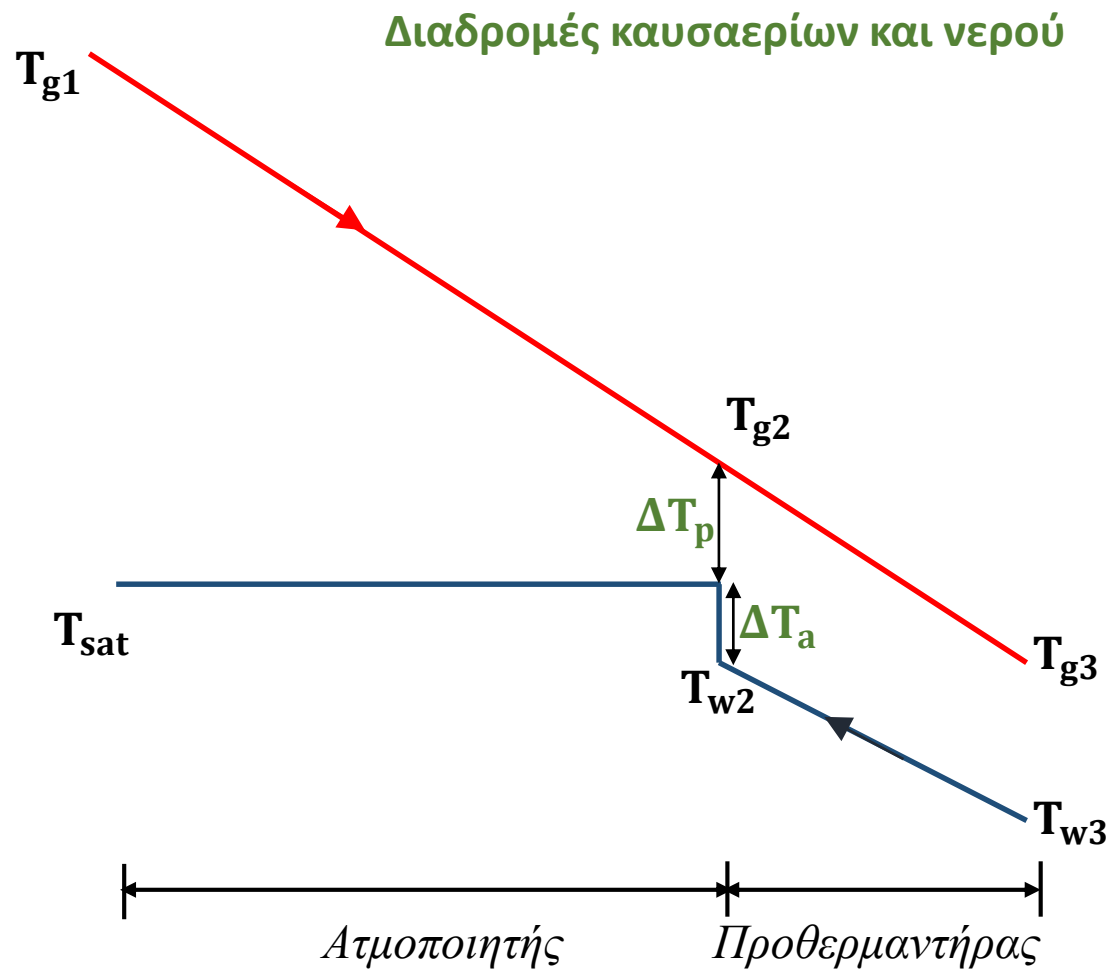
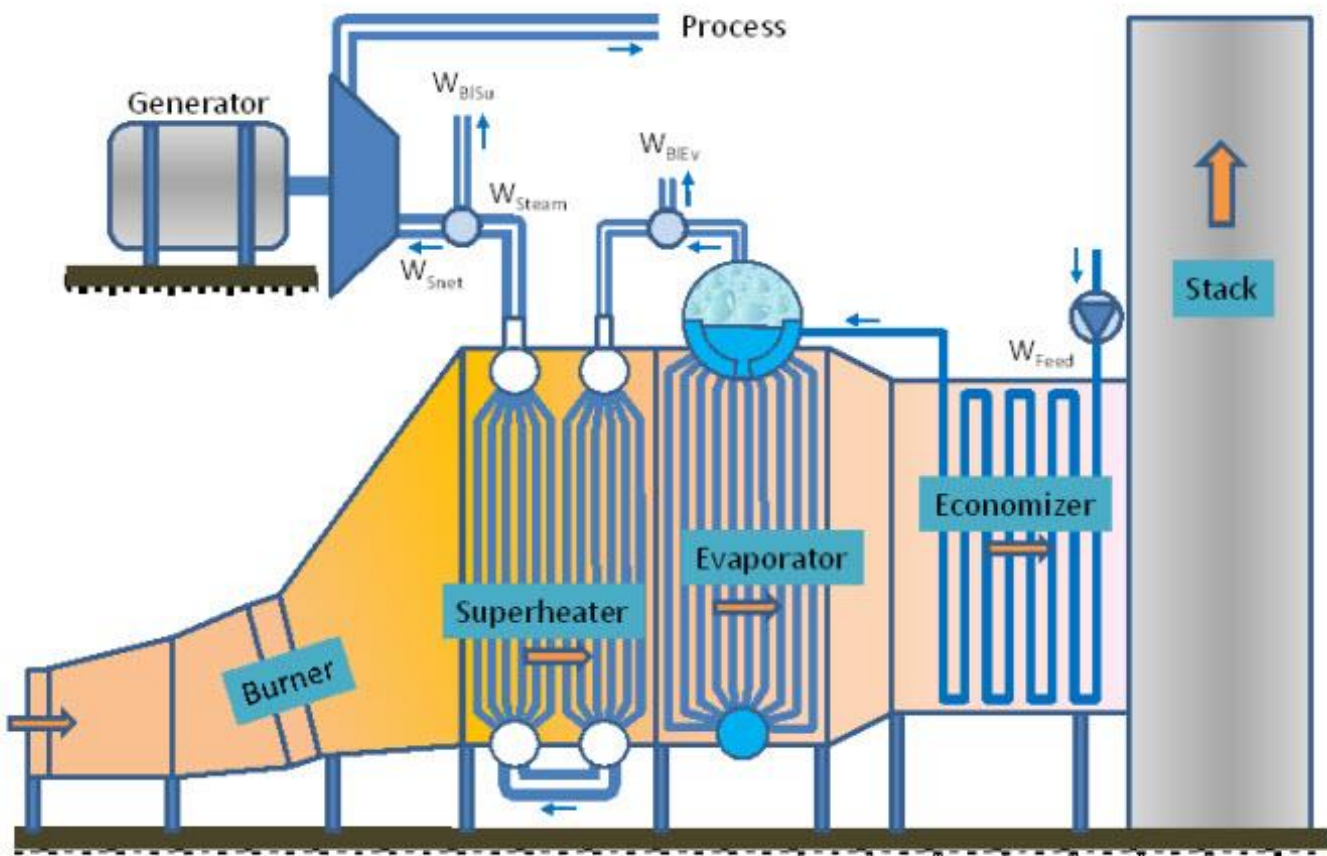
$e = \lambda - 1$: περίσσεια αέρα

C/H : κλάσμα μάζας

Συμπαράγωγή αεριοστρόβιλου-ατμοστρόβιλου



Λέβητας ανάκτησης θερμότητας καυσαερίων (HRSG)



Συμπληρωματικός καυστήρας (duct burner)

- Συμπληρωματική καύση αξιοποιεί την περίσσεια αέρα
- Αύξηση θερμοκρασίας απαερίων GT και δυναμικότητας HRSG

ΔT_a : προσέγγιση (approach point)

ΔT_p : στενωπός (pinch point)